

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**Ενεργειακά Ενήμερη Δρομολόγηση Πακέτων σε
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Αντρέας Σιακάς

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ιούνιος 2009

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ενεργειακά ενήμερη δρομολόγηση πακέτων σε
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Αντρέας Σιακάς

Επιβλέπων Καθηγητής

Γιώργος Σαμάρας

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Ιούνιος 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γιώργο Σαμάρα και τον διδακτορικό ερευνητή Παναγιώτη Αντρέου χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση των οποίων δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω αυτή την Διπλωματική εργασία.

Θα ήθελα επίσης να αναφέρω ότι η συνεργασία μου με τους συμφοιτητές μου Ορέστη Σπανό και Παναγιώτα Χαπούπη στον χώρο του εργαστηρίου υπήρξε καταλύτης στη δημιουργία του κατάλληλου παραγωγικού κλίματος εργασίας και βοήθησε στο να ξεπεραστούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της έρευνάς μας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που ανέχτηκαν όλο αυτό το διάστημα την, απαραίτητη για ολοκλήρωση της εργασίας, αντικοινωνική συμπεριφορά εκ μέρους μου.

Σας ευχαριστώ,

Αντρέας

Σιακάς

Περίληψη

Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας σε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων καταναλώνεται για την επικοινωνία μεταξύ κόμβων και ως αυτού αποτελεί αντικείμενο μεγάλου αριθμού ερευνών η μείωση κατανάλωσης ενέργειας στο επίπεδο δικτύου.

Σκοπός της διπλωματικής ατομικής εργασίας είναι η δημιουργία αλγορίθμου δρομολόγησης πακέτων και δημιουργίας δικτύου για μη δυναμικά δίκτυα αισθητήρων με όσο το δυνατό χαμηλότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας και αντίστοιχη αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Ο αλγόριθμος θα δημιουργεί το δίκτυο επιλέγοντας το υποσύνολο εκείνο των δυνατών συνδέσεων μεταξύ όλων των κόμβων έτσι ώστε κάθε κόμβος να επιλέγει τον κοντινότερο του κοστολογικά πατέρα και που θα διατηρεί τον δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο. Κατά την δρομολόγηση των πακέτων θα χρησιμοποιούνται εναλλακτικές διαδρομές για μετρίαση του φαινομένου άνισης κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των αισθητήρων, δηλαδή κάποιοι αισθητήρες να χρησιμοποιούνται περισσότερο από άλλους εξαντλώντας πιο γρήγορα τα ενεργειακά τους αποθέματα.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη	3
Περιεχόμενα.....	4
Εισαγωγή	6
1.1 Γενικά.....	6
1.1.1 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	7
1.1.2 Προκλήσεις στον χώρο των ΑΔΑ	8
1.1.2.1 Περιορισμένη ενέργεια και ακτίνα αποστολής.....	8
1.1.2.2 Ανάκτηση δεδομένων από ΑΔΑ.....	9
1.1.3 Σημερινά προβλήματα.....	13
1.1.3.1 Άγνοια θέσης	13
1.1.3.2 Χρήση μέσης τιμής	13
1.1.3.3 Μέτρηση χρόνου ζωής δικτύου	14
1.1.3.4 Κόστος επικοινωνίας μηνύματος.....	14
1.1.4 Η δική μας προσέγγιση.....	16
1.2 Συνεισφορά Εργασίας	17
1.3 Περιγραμματική Περιγραφή Περιεχομένων	18
Σχετική Εργασία	20
2.1 Δέντρα Δρομολόγησης Επερωτημάτων (Query Routing Trees).....	20
2.1.1 Shortest Path Tree (SPT).....	20
2.1.2 Dominating Set Tree (DST)	20

2.1.3	First Heard From (FHF)	22
2.2	Η διαφορά της δικής μας προσέγγισης	22
	Μοντέλο Συστήματος	23
3.1	Τοπολογία δικτύου	23
3.2	Μεταβολή ενέργειας αποστολής	24
3.3	Καταστάσεις συνδεσιμότητας	24
3.4	Στόχος δικτύου	25
3.5	Βασικές υποθέσεις	25
	Αλγόριθμος	27
4.1	Centralized έκδοση	27
4.1.1	CostThenHopcount - CTH	27
4.1.2	HopcountThenCost – HTC	28
4.1.3	Tree of Life 1 - ToL ₁	29
4.1.4	Tree of Life 2 – ToL ₂	30
4.2	Distributed Έκδοση	32
	Πειραματική αξιολόγηση	37
	Συμπεράσματα	Error! Bookmark not defined.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών τα τελευταία χρόνια έχει προκαλέσει την αύξηση στην δημοσιότητα όλο και πιο μικρών συσκευών όπως κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές παλάμης, συσκευές GPS και μιλάμε πλέον για την μετά-προσωπικού υπολογιστή εποχή (post PC) (1), στην οποία οι υπολογιστικές συσκευές έχουν χαμηλότερο κόστος αγοράς, είναι κινητές, καταναεμημένες και πιο χρήσιμες στην καθημερινή ζωή.

Είναι σήμερα δυνατό να κατασκευάσουμε, χρησιμοποιώντας commercial off-the-shelf (COTS) (2) εξαρτήματα, ενσωματωμένα συστήματα στο μέγεθος στο μέγεθος ενός τυπικού mouse που έχουν ανάλογες δυνατότητες με προσωπικούς υπολογιστές της δεκαετίας του '90. Τέτοιες συσκευές είναι οι Αισθητήρες (Sensor Devices).

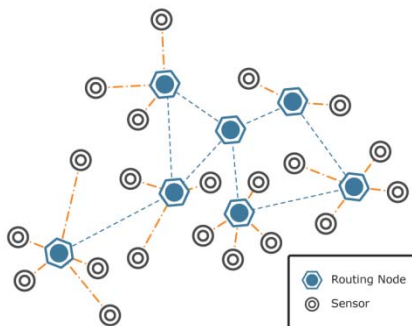
Μία συσκευή Αισθητήρα αποτελείται από μία μονάδα επεξεργασίας, μονάδα μνήμη, αισθητήρες περιβάλλοντος και μπαταρία. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από αυτό ενός πακέτου παπουτσιών μέχρι ενός κόκκου άμμου (smartdust) (3). Στόχος των αισθητήρων είναι η καταγραφή διαφόρων μετρήσεων από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται.

Η καταγραφή δεδομένων όμως δεν θα ήταν χρήσιμη αν δεν μπορούσαμε να έχουμε πρόσβαση σε αυτά τα δεδομένα και για αυτό έχουμε τους Αισθητήρες που είναι εξοπλισμένοι με κάποια μορφή ασύρματης επικοινωνίας τους Ασύρματους Αισθητήρες. Μια συλλογή από Ασύρματους Αισθητήρες (*Εικόνα 1*) ονομάζεται Wireless Sensor Network ή WSN (Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων - ΑΔΑ) (*Εικόνα 2*)



Εικόνα 1 Micaz

Αρχικά ανεπτυγμένα για στρατιωτική χρήση, χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύουν αλλαγές στο περιβάλλον και να τις μεταδίδουν στους υπόλοιπους Αισθητήρες μέσω μίας ευέλικτης αρχιτεκτονικής δικτύου. Τα δεδομένα που συλλέγουν οι Αισθητήρες μεταφέρονται τελικά σε Αισθητήρες Βάσης (base stations) οι οποίοι δεν αποτελούν τμήμα του δικτύου και απλά συλλέγουν τα δεδομένα για να τα μεταφέρουν σε κάποιο εξυπηρετητή ή στο διαδίκτυο. Χρησιμοποιώντας τελευταίας τεχνολογίας χαμηλής ενέργειας κυκλώματα ένας Αισθητήρας μπορεί, με δύο μπαταρίες ΑΑ και χαμηλό κύκλο εργασίας 1%, να παραμείνει σε λειτουργία για μέχρι και 3 χρόνια.



Εικόνα 2 ΑΔΑ

1.1.1 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ΑΔΑ έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα περιοχών μερικές από τις οποίες αναλύουμε πιο κάτω:

- Περιβαλλοντικές εφαρμογές:

Τα ΑΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρατήρηση περιβαλλοντικών αλλαγών. Ένα παράδειγμα αποτελεί η παρακολούθηση της μόλυνσης του νερού μιας λίμνης που βρίσκεται κοντά σε ένα εργοστάσιο που κάνει χρήση χημικών ουσιών. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε τυχαίες, εχθρικές περιοχές και να αναμεταδίδουν την ακριβή προέλευση ενός μολύνοντος υλικού στις αρχές ασφαλείας. Άλλα παραδείγματα αποτελούν η ανίχνευση πυρκαγιών και ο έλεγχος της μόλυνσης του αέρα στις πόλεις.

- **Στρατιωτικές εφαρμογές.**

Σε στρατιωτικές εφαρμογές τα ΑΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αναλώσιμοι πράκτορες στην παρακολούθηση των πεδίων μαχών. Μπορούν να καταγράφονται η θέση του εχθρού, η μετακίνηση οχημάτων, ακόμη και να εξασφαλίζεται η ασφαλής τοποθέτηση περισσότερων Αισθητήρων (4).

- **Κτηριακές εφαρμογές.**

Οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα κτήρια ή εργοστάσια για έλεγχο κλιματικών αλλαγών ακόμη και έλεγχο τον δονήσεων για πιθανές ζημιές στην δομή του κτηρίου (5)

- **Υγείας.**

Αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομετρικές εφαρμογές για βελτίωση της παρεχόμενης φροντίδας. Μελλοντικά οι Αισθητήρες θα μπορούν να ενσωματωθούν στο ανθρώπινο σώμα για παρακολούθηση ιατρικών προβλημάτων όπως καρκίνος και να βοηθούν τους ασθενείς στην διατήρηση την υγεία τους (6).

1.1.2 Προκλήσεις στον χώρο των ΑΔΑ

Όπως και κάθε άλλη τεχνολογία τα ΑΔΑ έχουν ένα αριθμό από περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό κάθε εφαρμογής που ετοιμάζεται για αυτά.

1.1.2.1 Περιορισμένη ενέργεια και ακτίνα αποστολής

Περιορισμένη ενέργεια. Ο κάθε Sensor σε ένα ΑΔΑ παίρνει την ενέργειά του συνήθως από μπαταρίες (7). Το μέγεθος και ο αριθμός των Sensor σε ένα ΑΔΑ κάνουν την αλλαγή ή επαναφόρτιση των μπαταριών αυτή απαγορευτική. Επίσης τοποθέτηση των Sensors γίνεται συχνά σε απόμακρα ή επικίνδυνα περιβάλλοντα. Ως αποτέλεσμα η αύξηση της διάρκειας ζωής των κόμβων αποτελούν πρωταρχικό σχεδιαστικό και κατασκευαστικό στόχο.

Περιορισμένη ακτίνα αποστολής δεδομένων. Λόγω της περιορισμένης ενέργειας που διαθέτει ο κάθε Αισθητήρας η ακτίνα αποστολής μηνυμάτων είναι περιορισμένη σε μερικές δεκάδες μέτρα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει η περίπτωση Αισθητήρες να

βρεθούν εκτός δικτύου και επίσης ότι δεν μπορούν όλοι οι Αισθητήρες να αποστείλουν μηνύματα απευθείας σε Αισθητήρα Βάσης δημιουργώντας την ανάγκη για αναμετάδοση των μηνυμάτων τους από άλλους Αισθητήρες.

Αντιμετώπιση προκλήσεων ενέργειας και ακτίνας αποστολής.

Οι δύο αυτοί κύριοι περιορισμοί, όσο αφορά την εργασία αυτή, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η επικοινωνία του στα ΑΔΑ να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών ενεργειακών αναγκών (8) μας υποδεικνύει γιατί το πεδίο που τυγχάνει της περισσότερης ερευνητικής προσοχής και έχει υψηλές προσδοκίες είναι αυτό της επικοινωνίας μεταξύ Αισθητήρων. Αρκετές προσεγγίσεις έχουν γίνει για την επίτευξη χαμηλής ενεργειακής απαίτησης πολλαπλών αναμεταδόσεων (multi-hop) επικοινωνίας γενικώς σε ad hoc networks. Αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την κεντρική τους ιδέα.

- Ο Έλεγχος Τοπολογίας (Topology control) (9) (10) (11) (12) στοχεύει στην μείωση της ενέργειας μετάδοσης προσαρμόζοντας την ακτίνα μετάδοσης του radio κάθε Sensor διατηρώντας όμως τις απαραίτητες ιδιότητες του δικτύου, όπως συνδεσιμότητα(connectivity) (13).
- Τα ενεργειακά ενήμερα (Power-aware) routing protocols (14) (15) (16) (17) (18) επιλέγουν κατάλληλες ακτίνες και διαδρομές μετάδοσης για διατήρηση ενέργειας σε multi-hop μετάδοση πακέτων.
- Διαχείριση ύπνου (Sleep control) ονομάζουμε την κάθε μέθοδο που θέτει τον Αισθητήρα σε κατάσταση νάρκης, με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας (8), και απενεργοποίηση της αντένας του με συνέπεια την αδυναμία αποστολής αλλά και λήψης μηνυμάτων και αφύπνισης του σε καθορισμένες χρονικές περιόδους.

1.1.2.2 Ανάκτηση δεδομένων από ΑΔΑ

Αν έχουμε μια αίθουσα που περιέχει ένα μεγάλο αριθμό ατόμων με το κάθε άτομο κρατά από ένα κομμάτι πληροφορίας. Ποιος είναι ο πιο καλύτερος τρόπος για να

μαζέψουμε όλες τις πληροφορίες σε ένα άτομο ή να επικοινωνήσουν δύο άτομα χωρίς να μετακινηθεί κανείς από τη θέση του; Το πρόβλημα μπορεί να ακούγεται απλό αλλά τι γίνεται όταν αρχίσουν όλοι να μιλάνε την ίδια ώρα; Πως συντονίζονται ώστε να παίρνει ένας τον λόγο κάθε φορά και αν η απόσταση από το άτομο στο οποίο πρέπει να μεταφερθεί η πληροφορία είναι πολύ μακριά σε ποιόν δίνουν την πληροφορία για να την μεταφέρει πιο κάτω;

Μεταφέροντας αυτό το κοινωνικό πείραμα στα WSNs η μορφή της ερώτησης γίνεται η εξής: Έχοντας δεδομένα σκορπισμένα σε ένα μεγάλο αριθμό Sensors ποιος είναι ο αποδοτικότερος, ενεργειακά και χρονικά, αλγόριθμος για την συλλογή των πληροφοριών, ή μετάδοσή τους από ένα Sensor σε ένα άλλο. Αναλυτικά αυτό σημαίνει:

- Ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency), στόχος είναι πάντα να καταναλώνεται η όσο το δυνατό λιγότερη ενέργεια για την διατήρηση ενός WSN σε λειτουργία για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα.
- Προσαρμοστικότητα ως προς το μέγεθος (Scalability) (19). Ικανότητα του δικτύου να διατηρεί της απαραίτητες ιδιότητες (Connectivity) ακόμη και μετά την προσθαφαίρεση κόμβων σε αυτό.
- Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service) (20), να μπορεί το δίκτυο να εγγυηθεί μεταφορά δεδομένων ανεξαρτήτου απωλειών (losses), εύρος ταχύτητας (bandwidth) και καθυστέρησης (delay).

Λύσεις για Δρομολόγηση (Routing) στα ΑΔΑ

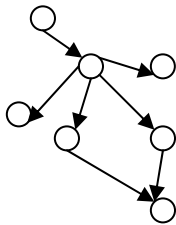
Ο αλγόριθμος δρομολόγησης κάθε Sensor έχει σαν σημαντικότερη λειτουργία την προώθηση του πακέτου στον επόμενο κόμβο του προορισμού του ή απόρριψη του πακέτου αν δεν τηρεί κάποια κριτήρια (Λήξη hop count, παλινδρόμηση). Η προώθηση του πακέτου αποτελεί τον πυρήνα κάθε πιθανής υλοποίησης ασύρματου δικτύου, καθώς απαιτεί την επιλογή του πατέρα (κόμβου στον οποίο θα προωθηθεί το πακέτο) και στην ουσία επιλέγεται η μορφή του δικτύου.

Πιο κάτω επεξηγείται η λειτουργία μερικών πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του network layer διαχωρίζοντας τα βάση των δύο βασικών κατηγοριών δομής των δικτύων (Flat και Hierarchical):

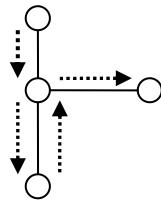
Επίπεδη δρομολόγηση (Flat)

Όλοι κόμβοι έχουν τον ίδιο ακριβώς ρόλο.

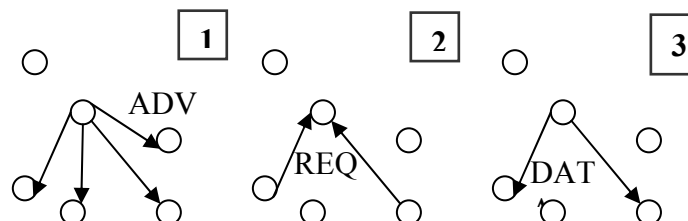
Flooding: Τα δεδομένα προωθούνται σε όλους τους γειτονικούς αισθητήρες ανεξάρτητα αν τα έχουν παραλάβει προηγουμένως ή όχι.



Gossiping: Παραλλαγή της κλασσικής μεθόδου flooding. Τα δεδομένα στέλνονται τυχαία σε ένα από τους γειτονικούς αισθητήρες για εξοικονόμηση ενέργειας.

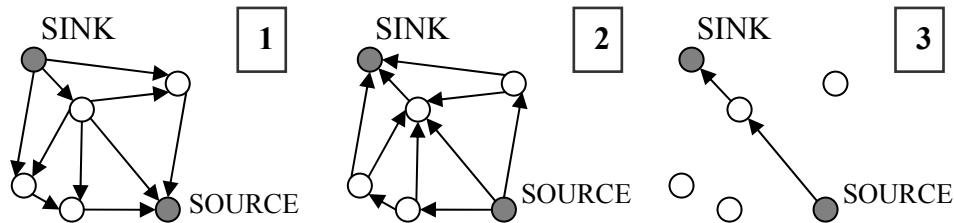


SPIN (Sensor Protocols for Information via Networking): Ακόμα μία παραλλαγή της κλασσικής τεχνικής Flooding. Τα δεδομένα αποστέλλονται στους αισθητήρες μόνον κατόπιν αιτήματος. Τα πακέτα διαχωρίζονται σε τρία είδη πακέτων. Τα πακέτα-αιτήματα (requests), τα πακέτα-διαφήμιση (advertisements) και τα πακέτα-δεδομένα (data).



Directed diffusion: Ο sink αποστέλλει αίτημα για δεδομένα, το οποίο προωθείται σε όλους τους αισθητήρες του δικτύου. Στη συνέχεια καθώς διαδίδεται το αίτημα σχηματίζονται τα μονοπάτια από την πηγή πίσω στον sink και τέλος αν υπάρχουν

δεδομένα που να αντιστοιχούν στο αίτημα επιλέγεται το μονοπάτι το οποίο περιέχει αυτά τα δεδομένα και αποστέλλονται στον sink.



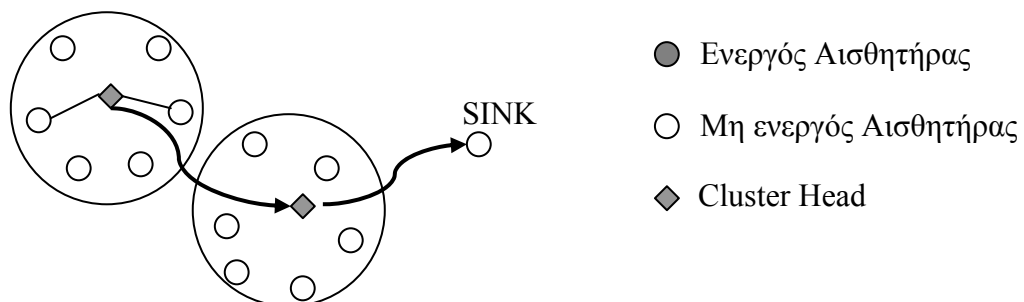
Ιεραρχικά (Hierarchical)

Ένα υποσύνολο των Αισθητήρων έχει επιπλέον καθήκοντα περισυλλογής, επεξεργασίας και προώθησης μηνυμάτων συντονιστικό ρόλο.

SMECN (Small Minimum Energy Communication Network): Δημιουργεί γράφο του δικτύου αισθητήρων στον οποίο περιέχονται τα μονοπάτια με τα οποία καταναλώνεται η ελάχιστη ενέργεια για να προωθηθούν τα πακέτα από κάθε αισθητήρα στον sink.

SAR (Sequential assignment routing): Δημιουργούνται πολλά δέντρα όπου η ρίζα του κάθε δέντρου είναι σε απόσταση ενός hop από τον sink. Το δέντρο που θα χρησιμοποιηθεί για να δρομολογηθούν τα δεδομένα στον sink επιλέγεται σύμφωνα στις ενεργειακές πηγές και το QoS.

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering-based Hierarchy): Σχηματισμός clusters για να ελαχιστοποιηθεί η διάχυση ενέργειας. Οι cluster heads επιλέγονται τυχαία έτσι ώστε να μειώνεται η διάχυση ενέργειας για επικοινωνία με το κεντρικό σταθμό και να κατανέμεται σε όλους τους αισθητήρες του δικτύου.

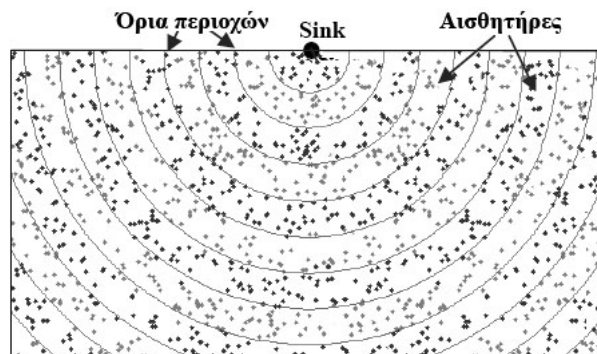


1.1.3 Σημερινά προβλήματα

Υπάρχει ένας αριθμός θεμάτων που δεν καλύπτονται από τις υπάρχοντες λύσεις.

1.1.3.1 Αγνοια θέσης

Αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στην περιοχή του Sink έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας καθώς αποτελούν σημείο συγκέντρωσης μηνυμάτων (21). Οι παρούσες λύσεις αγνοούν αυτό το γεγονός και δεν λαμβάνουν υπόψη κατά την δημιουργία του δικτύου το βασικό γεγονός ότι με την εξάντληση των Αισθητήρων γύρω από τον Sink το δίκτυο καθίσταται μη προσβάσιμο.



Εικόνα 3 Κατηγορίες Αισθητήρων

1.1.3.2 Χρήση μέσης τιμής

Μετρικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των δέντρων δρομολόγησης συχνά δεν είναι αντιπροσωπευτικές. Χρησιμοποιείται για παράδειγμα η μέση τιμή ενεργειακής κατανάλωσης σαν αντιπροσωπευτική τιμή της ενέργειας που χρειάζεται το δίκτυο ανά κύκλο. Όπως αναφέραμε πιο πάνω όμως το ενεργειακό φορτίο των κόμβων αυξάνεται καθώς πλησιάζουμε προς τον sink και η μέση τιμή κρύβει την διακύμανση που υπάρχει στην διαφορά ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ των κόμβων.

Ας κοιτάξουμε για παράδειγμα τα σχήματα στην Εικόνα 5 και στην Εικόνα 4 που δείχνουν το ενεργειακό φορτίο σε κόμβους με την ίδια τοπολογία αλλά διαφορετική συνδεσμολογία και το κόστος για κάθε κόμβο όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

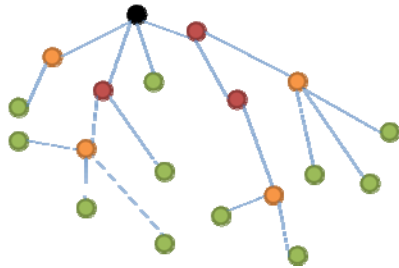
Πίνακας 1

Χρώμα	Υποθετικό κόστος
Πράσινο	1
Κίτρινο	2
Κόκκινο	3

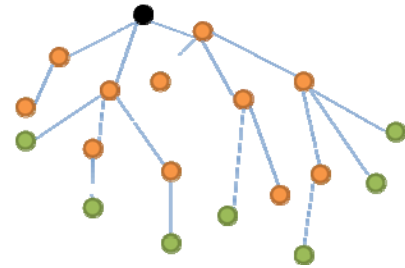
Οι τιμές για το μέσο κόστος θα είναι:

$$\text{AverageC}_{\Gamma_{\text{ράφος1}}} = (3 \cdot 3) + (4 \cdot 2) + (11 \cdot 1) / 19 = \mathbf{1.47}$$

$$\text{AverageC}_{\Gamma_{\text{ράφος2}}} = (11 \cdot 2) + (7 \cdot 1) / 19 = \mathbf{1.52}$$



Εικόνα 5 Γράφος 1



Εικόνα 4 Γράφος 2

Σύμφωνα όμως με όσα έχουμε αναφέρει πιο πάνω ο γράφος στην *Εικόνα 4 Γράφος 2*, ενώ η τιμή μέσου κόστους του είναι υψηλότερη, αποτελεί καλύτερη λύση καθώς τοποθετεί λιγότερο φορτίου στους κόμβους γύρω από τον Sink οι οποίοι με την εξάντλησή τους αποσυνδέουν τον Sink από το υπόλοιπο δίκτυο.

1.1.3.3 Μέτρηση χρόνου ζωής δικτύου

Σαν μονάδα μέτρησης της ζωής του δικτύου χρησιμοποιείται συχνά ο χρόνος μέχρι την απώλεια του πρώτου παιδιού (22). Δεν υπάρχει όμως καμία εγγύηση ότι αυτή η τιμή είναι αντιπροσωπευτική για τον χρόνο ζωής του μεγαλύτερου ποσοστού των κόμβων.

Το μέγεθος αυτό είναι το μόνο που έχει σημασία για συστήματα κριτικής σημασίας (critical) όμως δεν μπορεί να εφαρμόζεται τόσο απλά σε συστήματα που Σε περιπτώσεις που το σύστημα δεν είναι κριτικής σημασίας μια τιμή που θα μας δείχνει το ποσοστό των κόμβων που παραμένουν ενεργοί με το πέρασμα του χρόνου θα ήταν πιο αντιπροσωπευτική.

1.1.3.4 Κόστος επικοινωνίας μηνύματος

Οι πλείστες προσεγγίσεις σήμερα λαμβάνουν υπόψη μόνο το κόστος αποστολής μηνύματος και αγνοούν το κόστος λήψης. Πρόσφατες μελέτες έχουν όμως δείξει ότι τα δύο μεγέθη είναι εξίσου σημαντικά (23) (24) (25).

Για παράδειγμα στην *Εικόνα 6* βλέπουμε της δυνατές συνδέσεις μεταξύ των Αισθητήρων στο δίκτυο με το βάρος αποστολής. Στην *Εικόνα 8* και στην *Εικόνα 7* *Γράφος 2* έχουμε δυο πιθανές συνδεσμολογίες οι οποίες σύμφωνα με τις μετρικές που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν το ίδιο συνολικό κόστος αποστολής C (21).

$$C = \sum_{i=1}^n ((c_i \cdot r_i) \cdot p)$$

Σύμβολο	Εξήγηση
C	Συνολικό κόστος αποστολής
P	Μέγεθος μηνύματος σε bytes
c_i	Κόστος αποστολής για τον κόμβο i ανά byte
r_i	Αριθμός αναμεταδόσεων μηνυμάτων για τον κόμβο i

Το κόστους επικοινωνίας για τους γράφους θα είναι:

$$C_{\text{γράφου2}} = ((c_a \cdot 1) + (c_b \cdot 1) + (c_\gamma \cdot 2) + (c_\delta \cdot 3)) p = 17p$$

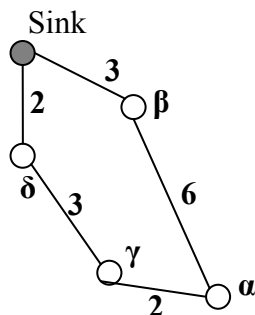
$$C_{\text{γράφου3}} = ((c_a \cdot 1) + (c_b \cdot 2) + (c_\gamma \cdot 1) + (c_\delta \cdot 2)) p = 17p$$

Αφού προσθέσουμε όμως στο μοντέλο το κόστος λήψης rc_i , και υποθέτοντας ότι είναι το κόστος λήψης είναι σταθερό για απλοποίηση, το κόστος αποστολής γίνεται το εξής:

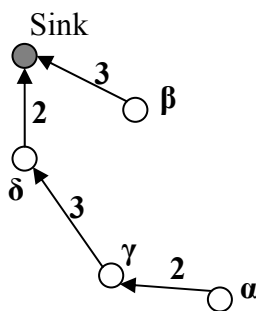
$$C = \sum_{i=1}^n ((c_i \cdot r_i) \cdot p + rc_i \cdot p)$$

$$C_{\text{γράφου2}} = ((c_a \cdot 1) + (c_b \cdot 1) + (c_\gamma \cdot 2) + (c_\delta \cdot 3)) p + ((rc_\gamma \cdot 1) + (rc_\delta \cdot 3)) \cdot p = 17p + 4 rc p;$$

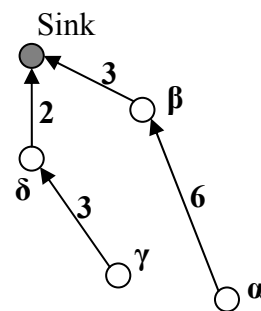
$$C_{\text{γράφου3}} = ((c_a \cdot 1) + (c_b \cdot 2) + (c_\gamma \cdot 1) + (c_\delta \cdot 2)) p + ((rc_b \cdot 1) + (rc_\delta \cdot 1)) \cdot p = 17p + 2 rc p;$$



Εικόνα 6 Γράφος 1



Εικόνα 7 Γράφος 2



Εικόνα 8 Γράφος 3

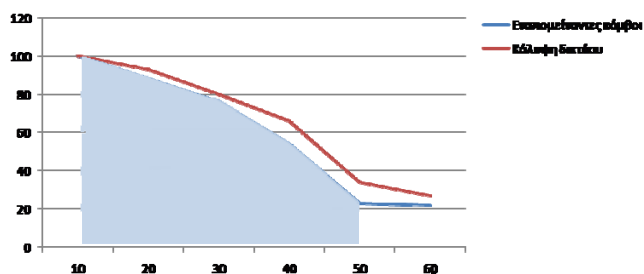
Είναι εμφανές πως η πληροφορία για το κόστος λήψης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην προσπάθεια εύρεσης ενός ιδανικού αλγόριθμου δρομολόγησης καθώς σε αυτή την περίπτωση μας δίνει την δυνατότητα να διαχωρίσουμε τις δύο πιθανές συνδεσμολογίες.

1.1.4 Η δική μας προσέγγιση

Με τον αλγόριθμο που προτείνουμε θα αντιμετωπίσουμε τις αδυναμίες των υπαρχόντων λύσεων εφαρμόζοντας νέες μετρικές για την διάρκεια ζωής του δικτύου, κόστος αποστολής για κάθε αισθητήρα και συμπερίληψη της θέσης του κάθε αισθητήρα στον υπολογισμό του κόστους του κόστους κάθε επιλογής πατέρα στο δίκτυο.

Διάρκεια ζωής δικτύου

Ενδεικτικό μέγεθος για την διάρκεια ζωής του δικτύου θα χρησιμοποιήσουμε το εμβαδό του σχήματος που προκύπτει από το την καμπύλη που δείχνει τους συνδεδεμένους με το δίκτυο Αισθητήρες σε συνάρτηση με τον χρόνο (Εικόνα 10 Διάρκεια Ζωής Δικτύου) μέχρι ένα προκαθορισμένο ποσοστό απώλειας Αισθητήρων (Εικόνα 9).



Εικόνα 10 Διάρκεια Ζωής Δικτύου



Εικόνα 9 Ενεργοί κόμβοι · χρόνο

Κόστος επικοινωνίας

Η γενική μορφή των εξισώσεων που χρησιμοποιούμε για υπολογισμό του κόστους επικοινωνίας είναι η εξής:

$$\text{Κόστος επικοινωνίας} = \text{Κόστος λήψης} + \text{Κόστος αποστολής}$$

$$\text{Κόστος αποστολής} = \frac{\text{Μέγεθος Μηνύματος}}{\text{Ταχύτητα Αποστολής}} \cdot \text{Κατανάλωση ενέργειας} \cdot CR$$

$$\text{Κόστος λήψης} = \frac{\text{Μέγεθος Μηνύματος}}{\text{Ταχύτητα Λήψης}} \cdot \text{Κατανάλωση ενέργειας} \cdot CR$$

$$CR = \text{Αναμεταδώσεις λόγω συγκρούσεων (Collision Retransmissions)}$$

Χρήση θέσης στην επιλογή πατέρα

Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη την θέση του κόμβου χρησιμοποιώντας την απόσταση σε hopcount από τον Sink στην επιλογή του πατέρα κάθε κόμβου.

Χρήση μέσης τιμής και διασποράς στον υπολογισμό του κόστους

Η διασπορά των τιμών κατανάλωσης ενέργειας στους Αισθητήρες μπορεί να μας δείξει κατά πόσο οι κόμβοι τείνουν να καταναλώνουν το ίδιο ποσό ενέργειας όμως από μόνη της δεν είναι χρήσιμη. Στόχος μας είναι να έχουμε τις τιμές κατανάλωσης σε παρόμοιο επίπεδο αλλά χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στην μέση τιμή και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε μια συνάθροιση των δύο τιμών.

1.2 Συνεισφορά Εργασίας

Αλγόριθμος ToL

Με αυτή την Διπλωματική Εργασία παρουσιάζουμε δύο νέους Centralized αλγόριθμους και ένα Distributed για την δημιουργία του δέντρου δρομολόγησης. Στόχος των αλγορίθμων είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής ενός ΑΔΑ που χρησιμοποιείται

περιοδικά για Συναθροιστηκές Συναρτήσεις (Aggregation Functions). Ονομάζουμε τον μας αλγόριθμο Δέντρο Της Ζωής (Tree of Life – ToL) και έχει τις εξής ιδιότητες.

Χαρακτηριστικά του αλγορίθμου αποτελούν:

- Σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου σε σχέση με άλλες μεθόδους δημιουργίας δέντρων δρομολόγησης όπως FHF και SPT
- Χαμηλό κόστος επιδιόρθωσης μετά την απώλεια ενός κόμβου.
- Εκτεταμένη αξιολόγηση μέσω προσομοίωσης με χρήση τυχαία δημιουργημένων δικτύων υψηλής, χαμηλής και μεσαίας πυκνότητας.
- Σχεδιασμένος συγκεκριμένα για χρήση σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν εντολές Aggregation (Average, Count, Maximum, Minimum, Sum) στο επίπεδο των Αισθητήρων
- Παράταση του χρόνου κάλυψης της περιοχής που παρακολουθείται λόγω μεγαλύτερης διάρκειας ζωής του δικτύου

1.3 Περιγραμιατική Περιγραφή Περιεχομένων

- Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2, του εγγράφου αυτού παρουσιάζουμε αλγορίθμους που θα χρησιμοποιήσουμε σαν σημεία αναφοράς προς τον ToF αναλύοντας τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε περίπτωσης.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρουμε το μοντέλο του συστήματος περιγράφοντας το πλαίσιο στο οποίο εργαστήκαμε και τις παραμέτρους των πειραμάτων.
- Το Κεφάλαιο 4 είναι αφιερωμένο στην ανάλυση των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ξεκινώντας με τους αλγορίθμους που μας έδωσαν μία διαίσθηση για την μορφή της λύσης και καταλήγοντας στον αλγόριθμο της κατανεμημένης λύσης.

- Ακολουθεί στο Κεφάλαιο 5 η εξαγωγή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές μελέτες και ανάλυση της σημασίας τους.
- Τέλος αναφέρουμε τον τρόπο με τον οποίο θα εργαστούμε μελλοντικά για περαιτέρω εμβάθυνση της έρευνας και εφαρμογή του αλγορίθμου σε άλλες πιο εκτενής περιοχές.

Κεφάλαιο 2

Σχετική Εργασία

2.1 Δέντρα Δρομολόγησης Επερωτημάτων (Query Routing Trees)

Query Routing Trees ονομάζουμε τα ΑΔΑ στα οποία οι Αισθητήρες εκτελούν λειτουργίες Βάσεων Δεδομένων (Data aggregation) στο υποσύνολο των αποτελεσμάτων που έχουν πριν τα μεταβιβάσουν στον επόμενο Αισθητήρα προς τον Sink. Παραδείγματα Query Routing Trees είναι:

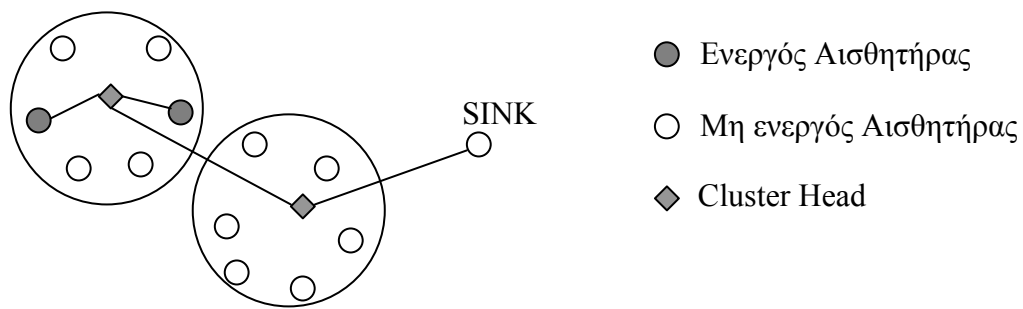
2.1.1 Shortest Path Tree (SPT)

Ο SPT (26) με είσοδο όλους τους κόμβους του δικτύου, των βαρών (κόστους αποστολής μεταξύ τους) και του επιλεγμένου ως επικεφαλή κόμβου ο αλγόριθμος μας δίνει τις ελάχιστες διαδρομές από τον επικεφαλή προς κάθε άλλο κόμβο (27). Αποτελεί δηλαδή Κεντρικοποιημένη Λύση (Centralized Solution) για επιλογή του πατέρα κάθε κόμβου έχοντας γνώση όλων των παραμέτρων.

Μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι βασίζεται στην υπόθεση πως το να χρησιμοποιούμε τις ελάχιστες διαδρομές θα σημαίνει απαραίτητα και μεγιστοποίηση στη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτή η υπόθεσή όμως καταρρίπτεται καθώς υπάρχουν αποδεδειγμένα λύσεις που παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα (28).

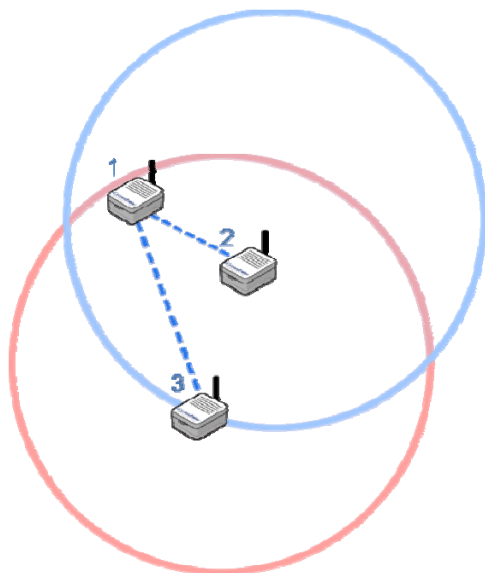
2.1.2 Dominating Set Tree (DST)

Στο DST (Δέντρο Κυριαρχούντων Συνόλων) (Dominating Set Tree, DST) (29) γίνεται επιλογή ενός υποσυνόλου V' από τους V κόμβους του δικτύου έτσι ώστε κάθε κόμβος που δεν βρίσκεται στο V' να είναι συνδεδεμένος με τουλάχιστο ένα στοιχείο του V' . Έτσι δημιουργούνται υποομάδες κόμβων γύρω από τους κόμβους που ανήκουν στο V' οι κόμβοι των οποίων επικοινωνούν μόνο με τον κοντινότερο τους V' κόμβο και οι V' επικοινωνούν μόνο μεταξύ τους. Πρόκληση είναι η επιλογή του ελάχιστου V' συνόλου. Το DST ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων Clustering (Εικόνα 11) και είναι επίσης Centralized.

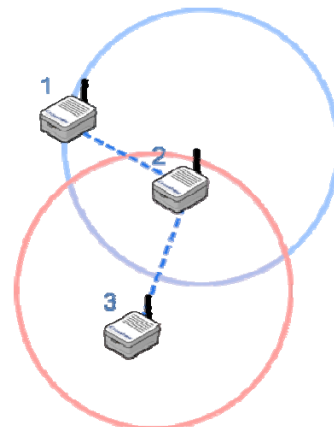


Εικόνα 11

Κύριο πρόβλημα κάθε προσέγγισης Clustering αποτελεί ο ανταγωνισμός για τον ίδιο πατέρα που σε αυτή την περίπτωση είναι ο Cluster Head. Στην Εικόνα 13 για παράδειγμα έχουμε τους κόμβους 2 και 3 να ανταγωνίζονται για την αποστολή μηνύματος στον κόμβο 1 με αποτέλεσμα να υπάρχει σπατάλη ενέργειας με τις αναμεταδώσεις λόγω συγκρούσεων και τον αυξημένο αριθμό ελέγχων για διαθεσιμότητα του Μέσου (συχνότητας). Αντίθετα στην Εικόνα 12 όπου δεν υπάρχει συναγωνισμός για τον ίδιο πατέρα ο αριθμός αναμεταδόσεων και ελέγχων διαθεσιμότητας του μέσου θα είναι μειωμένος όπως και η σπατάλη ενέργειας.



Εικόνα 13



Εικόνα 12

2.1.3 First Heard From (FHF)

Ο αλγόριθμος FHF (30) δημιουργεί ένα απλό αλλά αποτελεσματικό δέντρο δρομολόγησης. Ξεκινώντας από τον μοναδικό Αισθητήρα Βάσης, τον sink, αποστέλλει μήνυμα “υιοθεσίας” προς κάθε παραλήπτη. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα, και δεν έχει πατέρα, θέτει τον αποστολέα σαν πατέρα του και αναμεταδίδει το μήνυμα. Το δέντρο που παράγεται είναι πλήρως συνδεδεμένο και αποτελεί μια καλή βάση για χρήση επερωτήσεων στο ΑΔΑ.

Θετικό του αλγορίθμου FHF είναι η ευκολία δημιουργίας του αρχικού δέντρου και είναι ένα στοιχείο που θα εκμεταλλευτούμε στην δημιουργία του δικού μας δέντρου. Αρνητικό στοιχείο είναι και πάλι ο ανταγωνισμός του ίδιου πατέρα από αριθμό κόμβων όπως και στους αλγορίθμους Clustering.

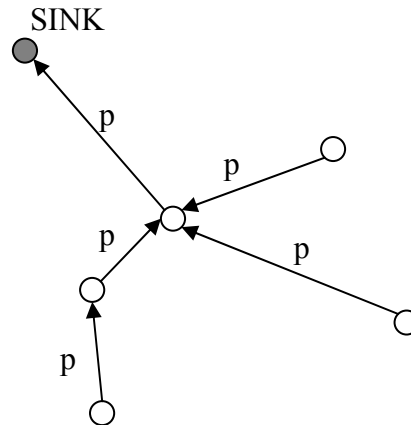
2.1.4 Energy-driven Tree Construction

Ο ETC (31) προτάθηκε ως κατανεμημένος αλγόριθμος για μετατροπή μιας τυχαίας δημιουργημένης συνδεσμολογίας σε ένα σχεδόν-ισορροπημένο δέντρο δρομολόγησης στο οποίο οι συγκρούσεις δεδομένων ελαχιστοποιούνται. Κεντρική ιδέα είναι η μεταφορά παιδιών από πατέρες που έχουν μεγάλο αριθμό παιδιών σε πατέρες με μικρό αριθμό παιδιών. Η διαφορά της δικής μας προσέγγισης είναι ότι επικεντρωνώμαστε στην περίπτωση που το δίκτυο χρησιμοποιείται για aggregation functions μόνο. Ο ETC από την άλλη χρησιμοποιείται για δημιουργία δέντρων που μεταφέρουν το σύνολο των πακέτων που παράγονται από όλους τους Αισθητήρες προς τον Sink.

2.2 Η διαφορά της δικής μας προσέγγισης

Πέρα από τις διαφορετικές μετρικές που χρησιμοποιήσαμε κατά την έρευνα μας, τμήμα 1.1.4, κύρια διαφορά της δικής μας προσέγγισης έγκειται στην αποκλειστική συγκέντρωση μας σε λειτουργίες Aggregation Functions που σημαίνουν ότι το μέγεθος του πακέτου που θα αποστέλλει ο κάθε Αισθητήρας θα παραμένει σταθερό. Θεωρούμε αμελητέα την περίπτωση που έχουμε το function count και το αποτέλεσμα ξεπερνάει το μέγιστο δυνατό φορτίου ενός πακέτου με μόνη επιλογή το σπάσιμο του πακέτου σε δυο νέα. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 14 ο κάθε Αισθητήρας αφού λάβει το σύνολο των

πακέτων που αναμένει εκτελεί την προκαθορισμένη λειτουργία (Aggregation Function) και προωθεί το πακέτο στον πατέρα του.



Εικόνα 14

Κεφάλαιο 3

Μοντέλο Συστήματος

3.1 Τοπολογία δικτύου

Θεωρούμε δεδομένη περιοχή με εμβαδό $R \times R$ και έχουμε ένα σύνολο $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ από n αισθητήρες στην επιφάνεια της περιοχής. Κάθε αισθητήρας αποτελείτε από τον επεξεργαστή, τοπική μνήμη, μπαταρία και μονάδα ασύρματης επικοινωνίας για λήψη και αποστολή μηνυμάτων. Κανένας αισθητήρας δεν έχει επίγνωση της θέσης του.

Οι αισθητήρες βρίσκονται κατανεμημένοι στην περιοχή έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία ενός πλήρως συνδεδεμένου γράφου. Δηλαδή για κάθε δυνατό διαχωρισμό

του συνόλου S σε S_a και S_b , ($S_a \cup S_b = S$ και $S_a \cap S_b = \emptyset$) να είναι δυνατή η σύνδεση

μεταξύ δύο τουλάχιστον αισθητήρων $s_a \in S_a$ και $s_b \in S_b$. Κάθε αισθητήρας καταλαμβάνει μία μοναδική θέση στην περιοχή, δηλαδή δεν μπορούν να υπάρχουν δύο αισθητήρες στο ίδιο γεωγραφικό σημείο.

Το σύνολο των αισθητήρων αποτελείται από $n-1$ απλούς αισθητήρες οι οποίοι μεταβιβάζουν πληροφορίες και ένα sink αισθητήρα που έχει την αποκλειστική αρμοδιότητα της μετάδοσης των πληροφοριών που συλλέγει το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (ΑΔΑ) προς κάποιο εξωτερικό προορισμό (Διαδίκτυο ή Κεντρικό Εξυπηρετητή).

3.2 Μεταβολή ενέργειας αποστολής

Οι αισθητήρες έχουν την δυνατότητα μεταβολής της ενέργειας μετάδοσης και κατ' επέκταση την ακτίνα μετάδοσης μηνυμάτων. Θεωρούμε μεταβλητή ενέργεια μετάδοσης, p : $0 \leq p \leq P$, όπου P η μέγιστη ενέργεια μετάδοσης όπως ορίζεται στα πλείστα communication components. Στην δική μας περίπτωση, χρησιμοποιούμε σαν πρότυπο το component CC2420 (Texas Instruments Incorporated) το οποίο υποστηρίζει 5 επίπεδα ενέργειας μετάδοσης $p = \{8.5\text{mV}, 9.9\text{ mV}, 11\text{ mV}, 14\text{ mV}, 17.4\text{ mV}\}$.

3.3 Καταστάσεις συνδεσιμότητας

Θεωρούμε δεδομένη την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ δύο συγκεκριμένων αισθητήρων που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη της μέγιστης επιτρεπτής από την ακτίνα μετάδοσης μηνυμάτων μέσω υπάρχοντος επιπέδου MAC. Αν για παράδειγμα ο αισθητήρας s_1 θέλει να μεταδώσει μήνυμα προς τον αισθητήρα s_2 τότε το μεταδίδει και εκτός από τον s_2 πιθανώς να ληφθεί και από άλλους αισθητήρες. Σε αυτή την περίπτωση οι υπόλοιποι αισθητήρες θα το απορρίψουν.

Θεωρείτε δεδομένο ότι μπορούν να υπάρξουν μόνο δύο καταστάσεις στην δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων, είτε αυτή θα είναι δυνατή με δεδομένη p ενέργεια μετάδοσης είτε όχι και δεν μπορεί να υπάρξει η περίπτωση περιοδικής δυνατότητας επικοινωνίας. Για εξασφάλιση της πλήρους συνδεσιμότητας του γράφου θεωρούμε την ύπαρξη δέντρου δρομολόγησης που δημιουργείται με πλημμύρα (flooding) και αρχικοποιείται από τον sink αισθητήρα. Με την δημιουργία του δέντρου κάθε αισθητήρας s_i γνωρίζει τον πατέρα του $f(s_i)$, το σύνολο των γειτόνων του $n(s_i)$ το σύνολο των εναλλακτικών πατέρων του $a(s_i)$: $a(s_i) \subseteq n(s_i)$ καθώς και το κόστος αποστολής προς τον κάθε γείτονα $w(s_i, n(s_i))$. ($w(s_i, n(s_i)) = p$).

3.4 Στόχος δικτύου

Σκοπός του δικτύου είναι η περιοδική εκτέλεση ενός Aggregation Function στα δεδομένα που έχουν συλλέξει οι κόμβοι. Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργία του δέντρου αποστολής μηνυμάτων ένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε μία από τέσσερις καταστάσεις: $F=\{\text{αδράνειας, αποστολής, λήψης, μέτρησης}\}$. Η κατανάλωση ενέργειας PC (Power Consumption) είναι:

$$pc(\text{αδράνειας}) = 426\mu V$$

$$pc(\text{αποστολής}) = p = \{8.5mV, 9.9 mV, 11 mV, 14 mV, 17.4 mV \}$$

$$pc(\text{λήψης}) = 18.8mV$$

3.5 Βασικές υποθέσεις

Υποθέτουμε ότι ο κάθε Αισθητήρας διαθέτει τους μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να γνωρίζει κατά πόσο έχει λάβει τα πακέτα από όλα του τα παιδιά πριν προχωρήσει στην όποια επεξεργασία τους.

Πίνακας 2: Ορισμός Συμβόλων

Σύμβολο	Ορισμός
ΑΔΑ	Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων
R	πλάτος, μήκος γεωγραφικού εμβαδού
S	σύνολο των αισθητήρων
s_i	αισθητήρας i
n	συνολικός αριθμός αισθητήρων
sinc	αισθητήρας που αποτελεί τελικό παραλήπτη των πακέτων που θα μεταβιβαστούν εκτός ΑΔΑ
P	μέγιστη ενέργεια μετάδοσης μηνυμάτων
p	παρούσα ενέργεια μετάδοσης μηνυμάτων
hop	δύο αισθητήρες που βρίσκονται εντός της ίδιας εμβέλειας αντένας έχουν απόσταση ενός hop μεταξύ τους
$n(s_i)$	σύνολο γειτόνων του αισθητήρα s_i που βρίσκονται σε απόσταση ενός hop από τον s_i
$f(s_i)$	ο πατέρας αισθητήρας του αισθητήρα s_i
$a(s_i)$	οι εναλλακτικοί πατέρες αισθητήρες του αισθητήρα s_i
$hc(s_i)$	hop count του κόμβου s_i
$w(s_i, n(s_i))$	το ενεργειακό κόστος αποστολής μηνύματος μεταξύ των κόμβων s_i και $n(s_i)$
F	κατάσταση του κόμβου

$PC(s_i)$	συνολική κατανάλωση ενέργειας για τον κόμβο s_i
$cc(s_i)$	κατανάλωση ενέργειας για επικοινωνία για τον κόμβο s_i
$tx(s_i)$	κατανάλωση ενέργεια για λήψη για τον κόμβο s_i
$rx(s_i)$	κατανάλωση ενέργεια για αποστολή για τον κόμβο s_i

Κεφάλαιο 4

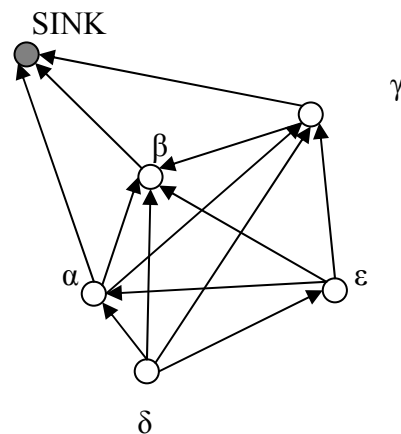
Αλγόριθμος

4.1 Centralized έκδοση

Αρχικά δημιουργήσαμε μια σειρά από Centralized αλγορίθμους που έχοντας πλήρη επίγνωση του δικτύου επιχειρούν να μας δώσουν την ιδανική λύση το NP-Hard (32) πρόβλημα του εντοπισμού ενός ιδανικού δέντρου δρομολόγησης. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος όμως δεν επέτρεπε μια brute force προσέγγιση και για αυτό το λόγο σε κάθε αλγόριθμος θέτουμε λογικές υποθέσεις και προχωρούμε βάση αυτών. Για περιγραφή των αλγορίθμων θα χρησιμοποιήσουμε τον γράφο στην Εικόνα 15 που δείχνει όλους τους πιθανούς συνδέσμους και τον Πίνακα 3 που δείχνει το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.

Πίνακας 3

	α	β	γ	δ	ϵ	Sink
α	-					
β	1	-				
γ	2	1	-			
δ	1	1	2	-		
ϵ	2	1	1	2	-	
Sink	2	1	2	∞	∞	-

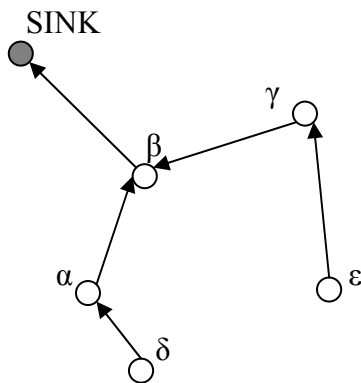


Εικόνα 15

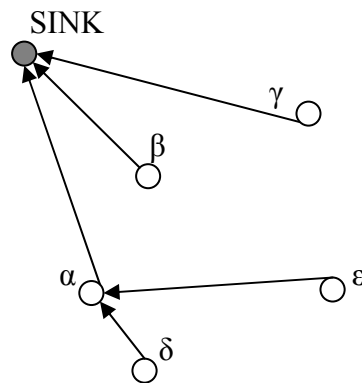
4.1.1 CostThenHopcount - CTH

Κοινό βήμα όλων των αλγορίθμων του προσομοιωτή είναι ο υπολογισμός με χρήση ευκλείδειας απόστασης των γειτονικών κόμβων $a(s_i)$ κάθε κόμβου s_i . Η απόσταση αυτή μεταφράζεται σε ενέργεια αποστολής $w(s_i, n(s_i))$ και αποθηκεύεται. Κατά τους υπόλοιπους υπολογισμούς δεν χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση παρά μόνο η ενέργεια αποστολής.

Για τον αλγόριθμο CTH η επιλογή του πατέρα είναι ιδιαίτερα απλή καθώς επιλέγουμε τον Αισθητήρα με το μικρότερο κόστος επικοινωνίας και αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας κόμβοι με ελάχιστο κόστος αποστολής επιλέγουμε εκείνο με το μικρότερο hopcount. Με τον όρο hopcount αναφερόμαστε στο βάθος του δέντρου στο οποίο βρίσκεται ένας κόμβος. Το hopcount υπολογίζεται αρχικά με την δημιουργία ενός FHF δέντρου (Εικόνα 17). Το δέντρο δρομολόγησης που προκύπτει από τον αλγόριθμο CTH βρίσκεται στην Εικόνα 16.



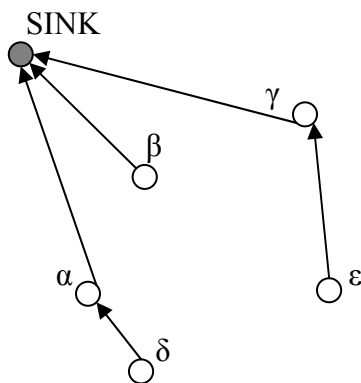
Εικόνα 16



Εικόνα 17

4.1.2 HopcountThenCost – HTC

Για τον αλγόριθμο HTC η επιλογή του πατέρα γίνεται με αντίθετη προτεραιότητα από ότι στον CTH. Διαλέγουμε δηλαδή σαν πατέρα τον Αισθητήρα με το μικρότερο hopcount και αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας κόμβοι με ελάχιστο hopcount επιλέγουμε εκείνο με το μικρότερο κόστος αποστολής. Το δέντρο δρομολόγησης που προκύπτει από τον αλγόριθμο HTC βρίσκεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18

4.1.3 Tree of Life 1 - ToL₁

Κεντρική Ιδέα:

- Δημιουργία ενός αρχικού FHF δέντρου
- Ακολουθώντας αντίστροφη διαδρομή BFS διαδρομή επιλέγουμε τον πατέρα του κάθε κόμβου
- Υπολογισμός βάρους της κάθε επιλογής με βάση:
 - ο Σταθμισμένης αναλογίας μέσου όρου και διασποράς του κόστους αποστολής για κάθε κόμβο
 - ο Με το κόστος κάθε κόμβου να σταθμίζεται με το hopcount του. Όσο πιο κοντά βρίσκεται στον Sink τόσο μεγαλύτερο βάρος έχει το κόστος του στο σύνολο.

Ιδανικά θα θέλαμε να μπορούμε να ελέγξουμε όλους τους συνδυασμούς συνδεσμολογίας γράφων για να μπορέσουμε να επιλέξουμε αυτόν που θα θεωρούσαμε ως λιγότερο ενεργειακά απαιτητικό. Καθότι αυτό είναι αδύνατο λόγω περιορισμένης υπολογιστικής ικανότητας αποφασίσαμε την σταδιακή επιλογή του ιδανικού πατέρα για κάθε κόμβο.

Η σειρά με την οποία θα γινόταν όμως η επιλογή πατέρα έχει επίσης σημασία και για αυτό το λόγο μετά από χειριστικούς ελέγχους καταλήξαμε σε δύο επιλογές που αποτελούν και την διαφορά ανάμεσα στους αλγορίθμους ToL₁ και ToL₂. Με τον ToL₁ ακολουθούμε διαδρομή Breadth First Search – BFS αντίστροφα, για το παράδειγμά μας αυτό σημαίνει {δ,ε,α,β,γ}.

Ξεκινώντας λοιπόν από τον Αισθητήρα δ για κάθε πιθανό του πατέρα υπολογίζουμε το κόστος επικοινωνίας $cc(s_i)$ για κάθε Αισθητήρα στο δίκτυο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$cc(s_i) = \text{bytesReceived} \cdot tx(s_i) + \text{bytesSend} \cdot rx(s_i)$$

Σταθμίζουμε την τιμή αυτή με το hopcount του κόμβου ως εξής:

$$\text{WeightedCost}(s_i) = (1/hc(s_i)) \cdot cc(s_i)$$

Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι η το βάρος του ενεργειακού κόστους για τους κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στον Sink θα είναι μεγαλύτερο από αυτό των κόμβων που βρίσκονται πιο μακριά.

Στης συνέχεια βρίσκουμε τον μέσο όρο (Average) των $\text{WeightedCost}(s_i)$ καθώς και την διασπορά (σ) αυτής της τιμής. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το κόστος λύσης ως:

$$\text{CostSolution} = (w_1 \cdot \text{Ave}) + (w_2 \cdot \sigma)$$

Τέλος θέτουμε σαν πατέρα τον Αισθητήρα με το χαμηλότερο κόστος λύσης.

4.1.4 Tree of Life 2 – ToL₂

Για τον αλγόριθμο ToL₂ ακολουθούμε ακριβώς την ίδια τεχνική όπως και στον αλγόριθμο ToL₁ ακολουθούμε με τη διαφορά πως η διαδρομή που ακολουθούμε εδώ για την επιλογή πατέρα των Αισθητήρων είναι η Depth First Search – DFS αντίστροφα.

Στο παράδειγμά μας αυτό θα σημαίνει: {ε,δ,α,β,γ}

Ψευδοκώδικας Αλγορίθμου:

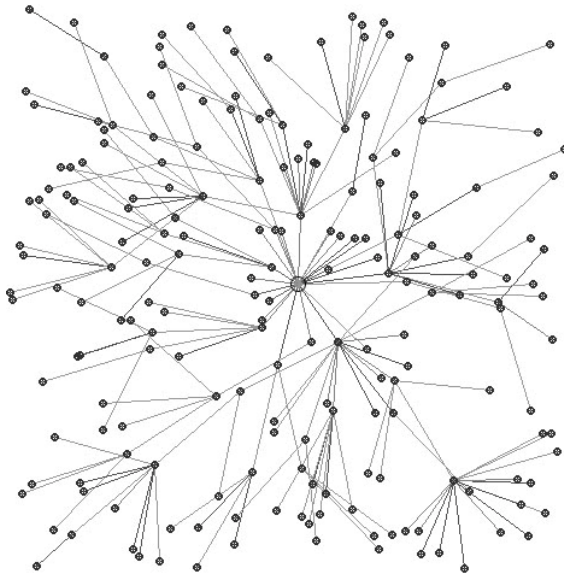
```

bestWeighedCost =  $\infty$  //initialize best WeightedCost as infinite
create FHF tree      //create a simple FHF routing tree
for each  $s_i \in S$       //calculate each nodes hopcount
     $hc(s_i) =$         calculate nodeHopcount(tree)
routeList      =      calculate reverseBFS/reverseDFS(tree)
for each  $s_i \in routeList$     //for each node in the reverseBFS/reverseDFS list
    for each  $s_j \in n(s_i)$     //for each one hop neighbor  $s_j$  of node  $s_i$ 
        backup =  $f(s_i)$  //save previous parent
         $f(s_i) = s_j$       //temporarily set  $s_j$  as then parent of  $s_i$ 
        if(checkFullyConnected(tree))
            for each  $s_k \in S$       //calculate the cost of communication for  $s_k$ 
                 $cc(s_i) =$  calculateCommunicationCost(tree)
            WeighedCost = calculateWeighedCost(cc(S))
            if WeighedCost < bestWeighedCost
                bestWeighedCost = WeighedCost
            else
                 $f(s_i) = backup$ 
        else
             $f(s_i) = backup$ 
    end loop;
end loop;

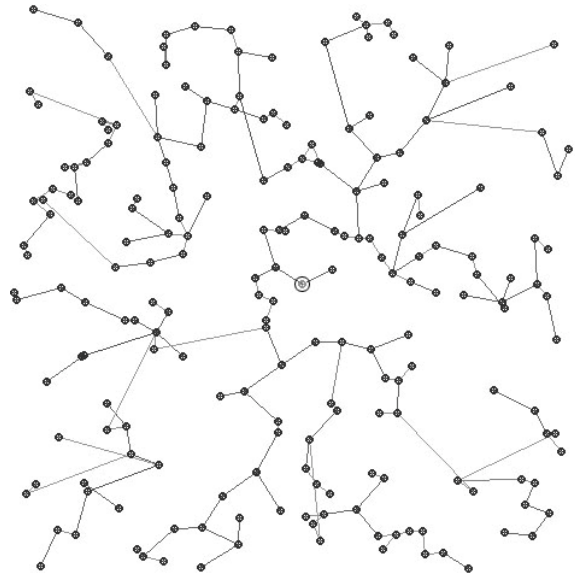
```

4.2 Distributed Έκδοση

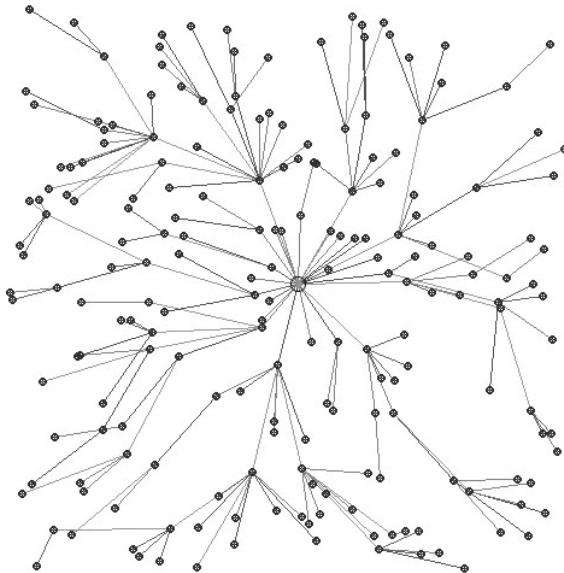
Στηριζόμενοι στα θετικά αποτελέσματα των ToL_1 και ToL_2 , που θα αναλύσουμε στο Κεφάλαιο 5, προσπαθήσαμε να τα αναπαράγουμε χρησιμοποιώντας μια κατανεμημένη (distributed) προσέγγιση. Ακολουθεί μια γραφική αντιπροσώπευση ενός δικτύου με 200 αισθητήρες για όλους τους αλγόριθμους.



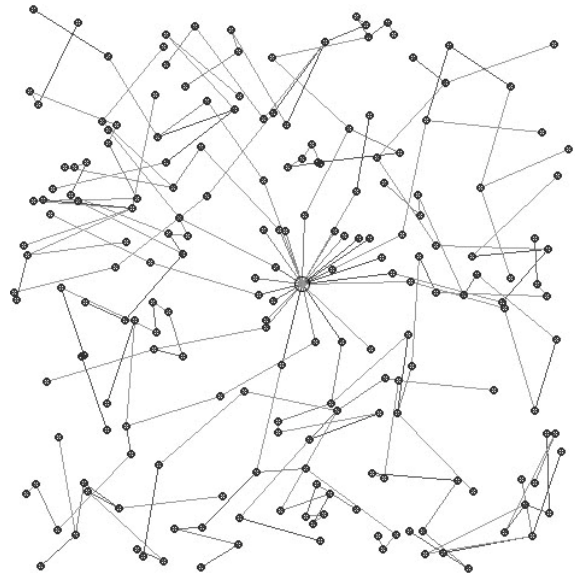
Εικόνα 19 FHF



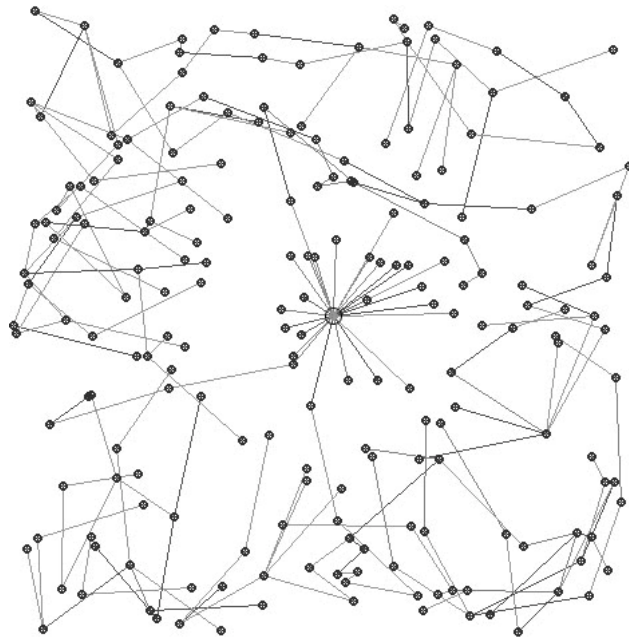
Εικόνα 20 CTH



Εικόνα 21 HTC



Εικόνα 22 ToL1



Εικόνα 23 ToL₂

4.2.1 VariableHopCount - VHOP

Καθότι ο DToL είναι χειριστικός (heuristic) αλγόριθμος προσπαθήσαμε να επιτύχουμε μία συνδεσμολογία παρόμοια με αυτή των ToL 1 και 2 μέσω πειραματικών δοκιμών και χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές για κάθε Αισθητήρα πληροφορίες.

Κοιτάζοντας την συνδεσμολογία των δύο ToL παρατηρούμε μια ιδιόμορφη σύνθεση στην οποία οι Αισθητήρες δείχνουν να συμπεριφέρονται διαφορετικά στην επιλογή του πατέρα τους αναλόγως της απόστασής τους από τον Sink.

- Αισθητήρες σε απόσταση ενός hop από τον Sink επιλέγουν τον Sink σαν πατέρα τους
- Αισθητήρες κοντά στον Sink αλλά σε απόσταση μεγαλύτερη του ενός hop επιλέγουν να μην συνδεθούν με κόμβους συνδεδεμένους με τον Sink αλλά στρέφονται προς κόμβους ακόμη πιο μακριά από τον Sink απ ότι οι ίδιοι.

- Αισθητήρες στα άκρα του δικτύου, με το μεγαλύτερο δυνατό hopcount δηλαδή τείνουν να επιλέγουν κόμβους με παρόμοιο hopcount με τους ίδιους σαν πατέρα τους.

Έτσι η πρώτη μας προσπάθεια στην εύρεση ενός τοπικού αλγορίθμου, ο VHOP VariableHopCount, που θα προσπαθούσε να μιμηθεί την συνδεσμολογία των ToL ήταν βασισμένη στο hopcount του κάθε κόμβου το οποίο θεωρούσαμε ως δεδομένο ότι ο κάθε κόμβος γνώριζε. Θεωρήσαμε επίσης δεδομένη την γνώση του μέγιστου βάθους του δέντρου (maxHop). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείτο για να γνωρίζει ο Αισθητήρας την σχετική του θέση στο δέντρο και την αντίστοιχη συμπεριφορά που θα έπρεπε να έχει.

Τέλος εισαγάγαμε στο μοντέλο μας το κόστος επικοινωνίας σαν την μοναδιαία τιμή της ενέργειας που βρίσκεται η αντένα του Αισθητήρα για επικοινωνία με τον κάθε γειτονικό κόμβο.

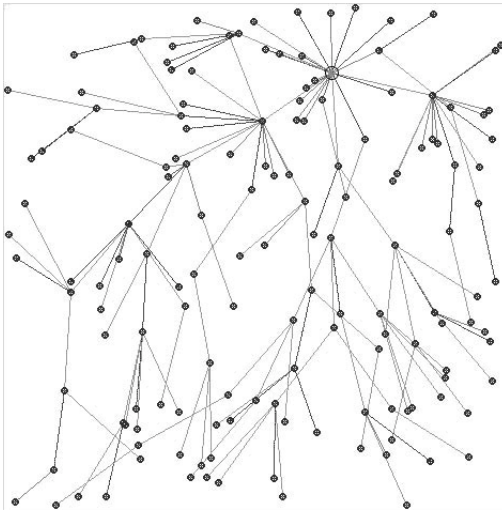
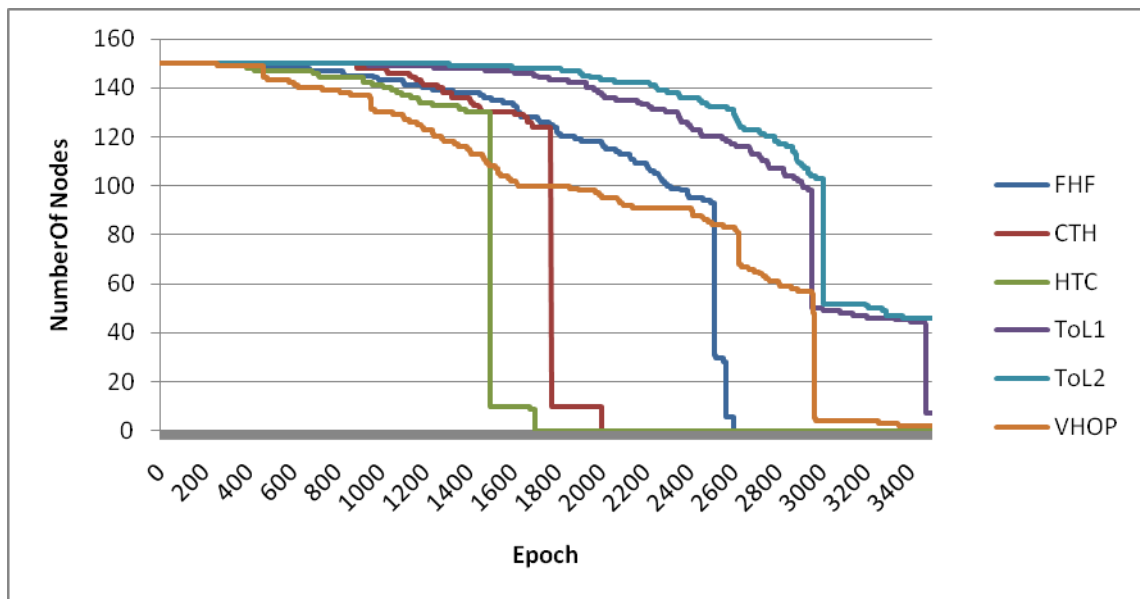
Τα αρχικά αποτελέσματα έδειχναν τον τοπικό αλγόριθμο να έχει παρόμοια επίδοση με τον FHF δημιουργώντας την εντύπωση πως με μερικές βελτιώσεις θα μπορούσε να πλησιάσει την επίδοση των ToL.

Μετά από ένα μεγάλο αριθμό πειραματισμών κατά τους οποίους επιχειρούσαμε βελτίωση μέσω τροποποίησης των βαρών που δίνουμε στα μεγέθη του

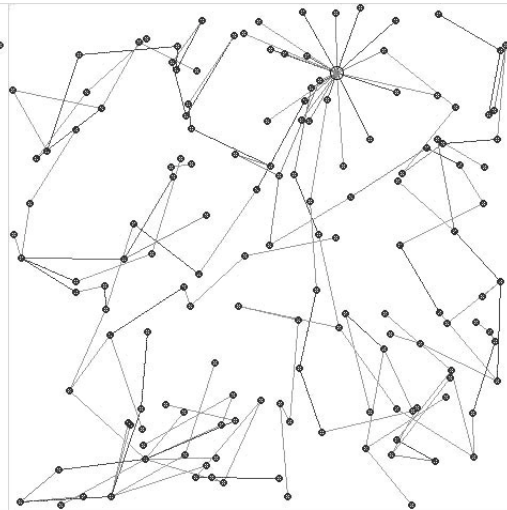
- hopcount του Αισθητήρα,
- κόστους επικοινωνίας με τον υποψήφιο πατέρα
- και του hopcount του υποψήφιου πατέρα

αποφασίσαμε πως η προόδος που αναμέναμε δεν θα ήταν εφικτή τόσο σε θέμα αποτελεσμάτων όπως βλέπουμε στον Πίνακας 4 πιο κάτω αλλά και όσο και σε συνδεσμολογία.

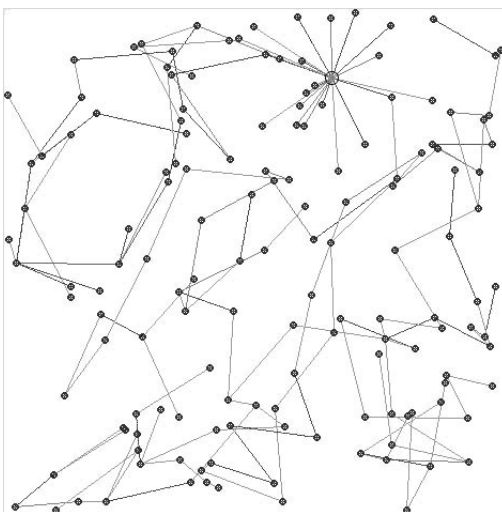
Πίνακας 4



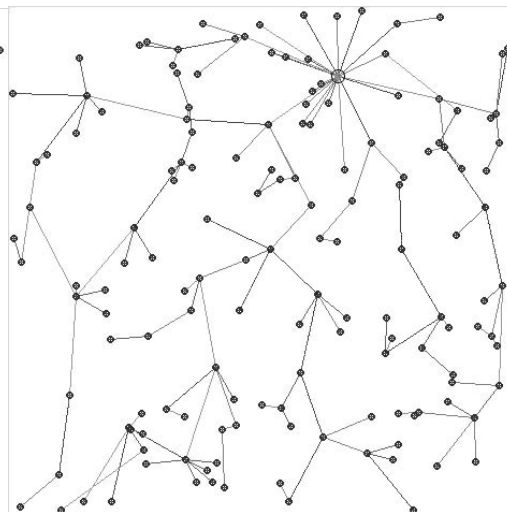
Εικόνα 24 FHF



Εικόνα 25 ToL1



Εικόνα 26 ToL2



Εικόνα 27 VHOP

4.2.2 Distributed Tree of Life – DToL

Η ιδέα για τον DToL προήρθε μετά από την διαισθητική άποψη που μας έδωσαν οι προηγούμενες προσεγγίσεις και ακολουθεί μια πολύ απλή λογική.

Βήμα 1

Δημιουργούμε ένα FHF δέντρο

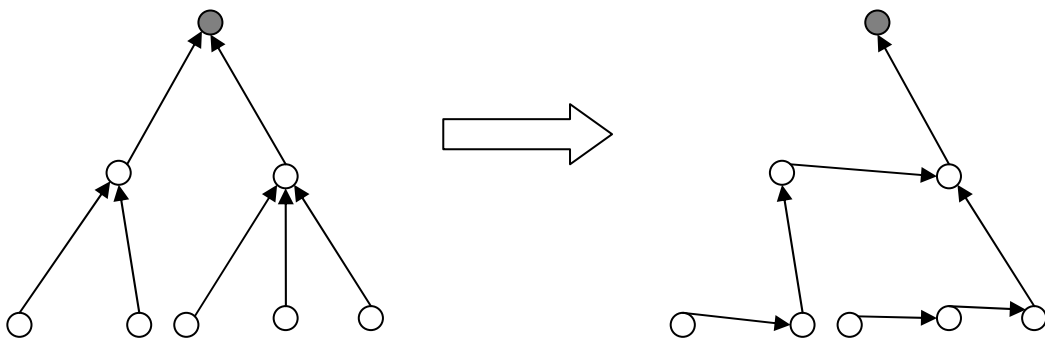
Βήμα 2

Έλέγχουμε για κάθε κόμβο:

Για κάθε γείτονα

Αν ο πατέρας του γείτονα είναι ο ίδιος με τον πατέρα του κόμβου τότε

Ο κόμβος θέτει σαν πατέρα του τον γείτονα



Με τον απλό αυτό αλγόριθμο διατηρείται η συνδεσιμότητα του δέντρου και με ένα απλό μετασχηματισμό σε ένα δέντρο FHF να έχουμε αποτελέσματα παραπλήσια σε αυτά των ToL όπως θα δείξουμε στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 5

Πειραματική αξιολόγηση

5.1 Μεθοδολογία Πειραμάτων

Για την σύγκριση των αλγορίθμων δημιουργίας δέντρων χρειαζόμασταν μία μέθοδο που θα μας έδινε την ευελιξία γρήγορων αλλαγών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο αν επιτεθεί στον πραγματικό κόσμο των ΑΔΑ με την αβεβαιότητα για το χάσιμο πακέτων και την πρακτική δυσκολία του προγραμματισμού εκατοντάδων Αισθητήρων.

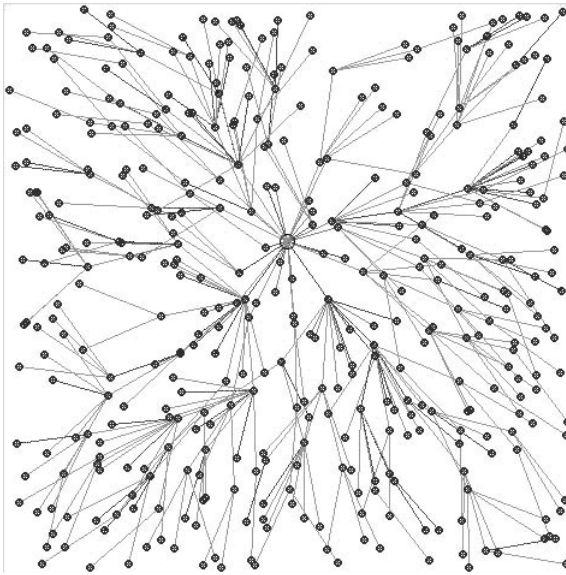
Προχωρήσαμε έτσι στην υλοποίηση ενός προσομοιωτή ο οποίος μας παρέχει τις πιο κάτω δυνατότητες

- Δημιουργία τυχαίων περιοχών κόμβων με επιλογή του αριθμού των κόμβων και του πλάτους της RxR περιοχής
- Εκτέλεση σεναρίου κατά το οποίο όλοι οι κόμβοι αποστέλλουν πακέτα εφόσον διαθέτουν ενέργεια και παραμένουν συνδεδεμένα με το δίκτυο. Το σενάριο τερματίζεται με την εξάντληση όλων των κόμβων του δικτύου
- Γραφική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας των κόμβων
- Δημιουργία αρχείων αναλυτικών αποτελεσμάτων που περιέχουν τον αριθμό των κόμβων που παραμένουν συνδεδεμένοι με το δίκτυο, τον αριθμό των κόμβων που παραμένουν ενεργοί και το ποσοστό κάλυψης της περιοχής στην οποία είναι ανεπτυγμένο το δίκτυο.

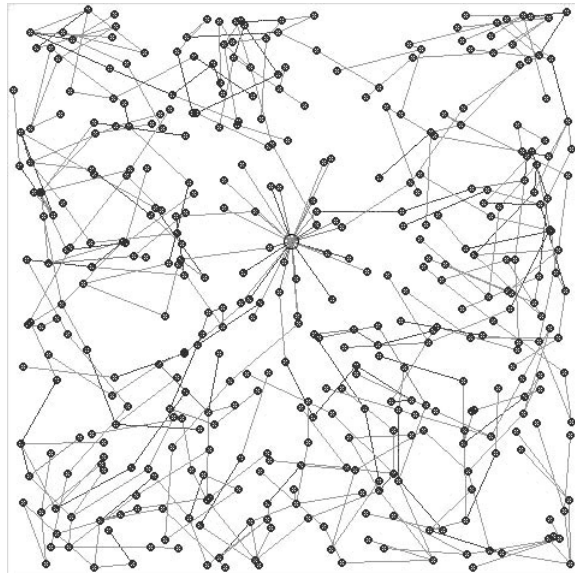
5.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Με σκοπό την απόδειξη της γενικότητας της λύσης μας εφαρμόσαμε τους αλγορίθμους ToL σε ένα αριθμό από τεχνητές, τυχαίες, χαμηλής και υψηλής πυκνότητας τοπολογίες δικτύων. Παραθέτουμε μια σειρά από αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πιο κάτω.

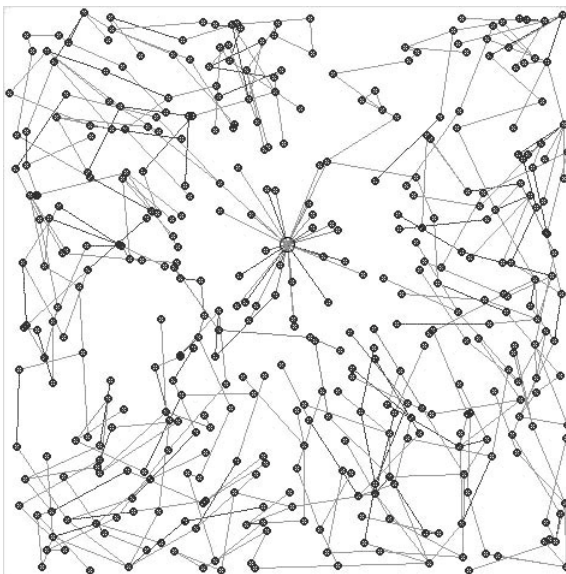
5.2.1 Τοπολογία υψηλής πυκνότητας



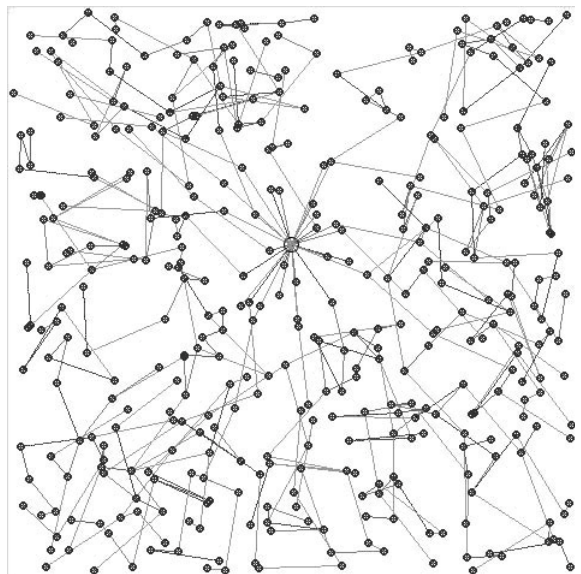
Εικόνα 28 FHF



Εικόνα 29 ToL1



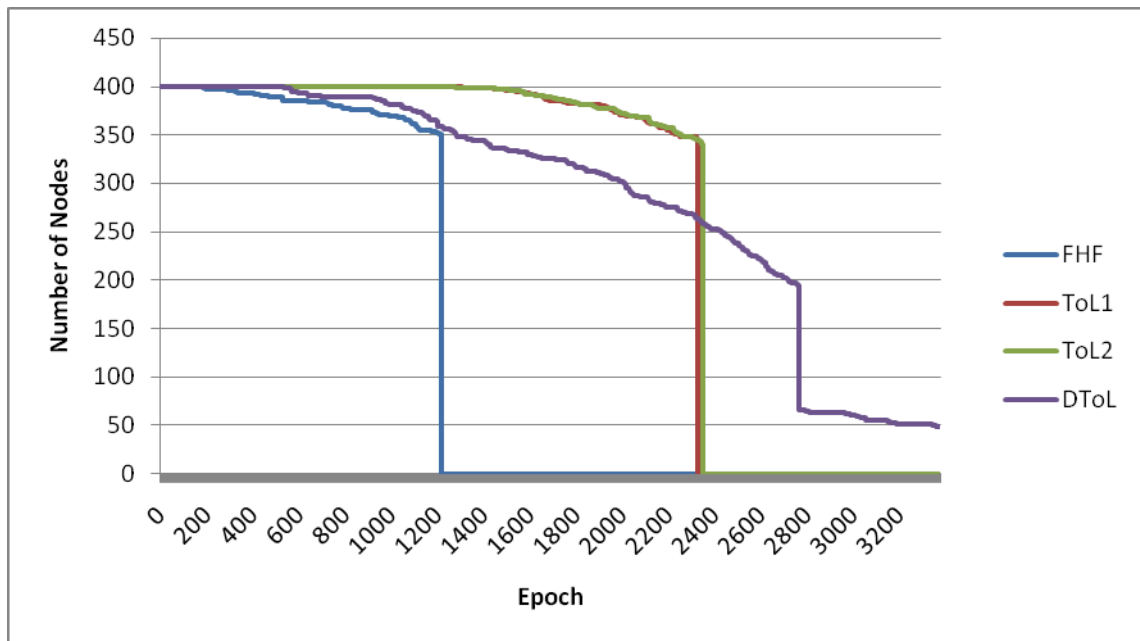
Εικόνα 30 ToL2



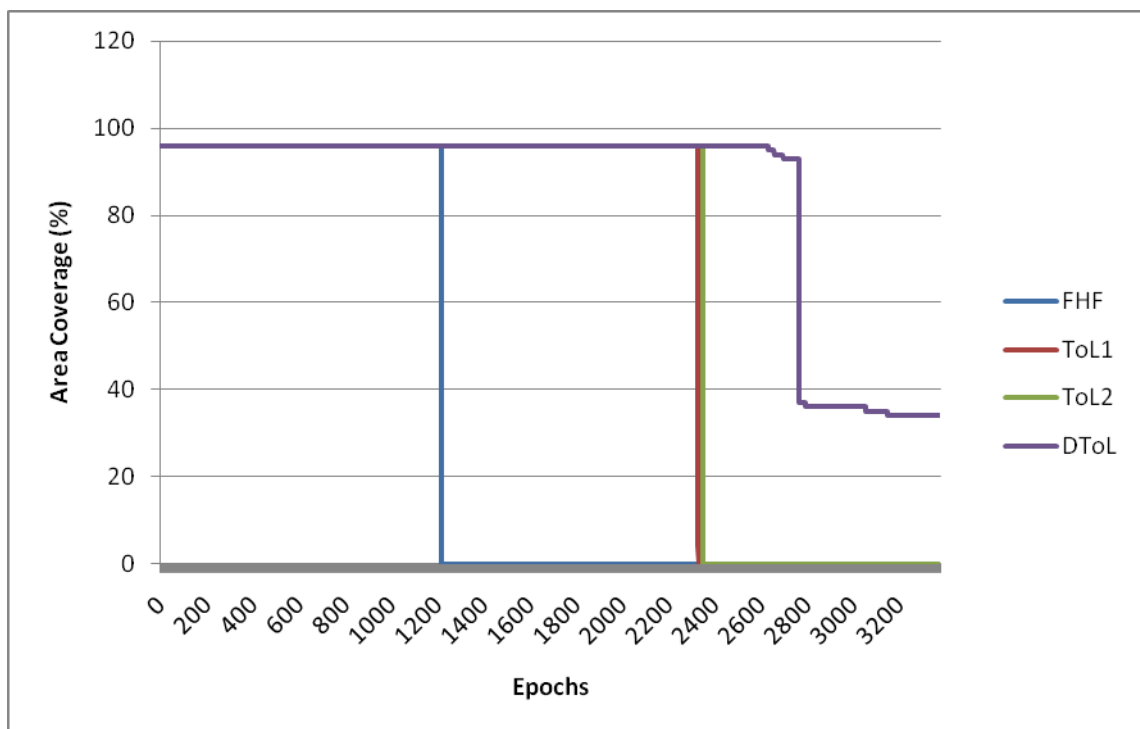
Εικόνα 31 DToL

Το δίκτυο αποτελείται από 400 κόμβους σε μία περιοχή 200x200 μετρών.

Πίνακας 5 Ζωή δικτύου



Πίνακας 6 Κάλυψη δικτύου

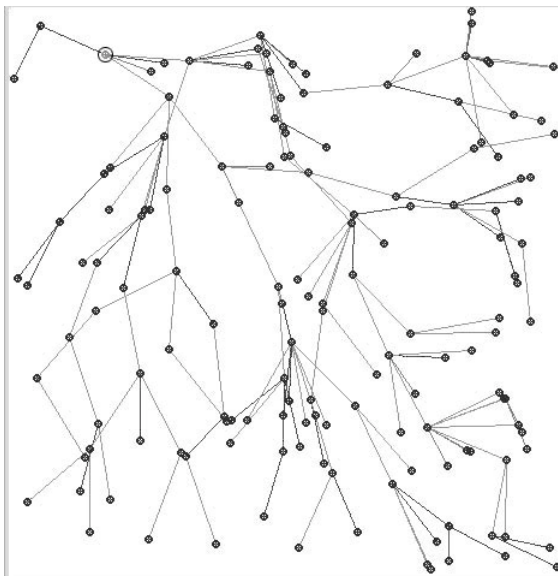


Από την γραφική παράσταση της ζωής δικτύου παρατηρούμε ότι ο DToL έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον FHF σε κάθε περίπτωση αλλά επίσης διατηρεί ένα μεγάλο ποσοστό των κόμβων για τον χρόνο αφού οι ToL₁ και ToL₂ έχουν σχεδόν εξαντλήσει το δίκτυο.

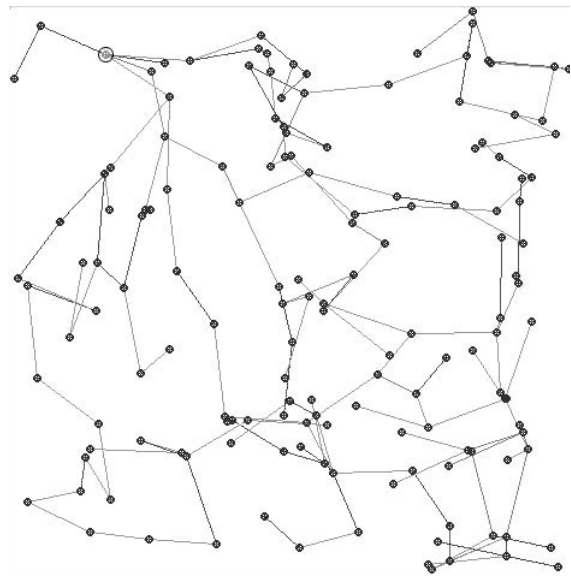
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κάλυψη του δικτύου καθώς ενώ με τον DToL φαίνεται να έχουμε μεγαλύτερη απώλεια κόμβων από ότι με τους ToL₁ και ToL₂ εντούτοις η κάλυψη του δικτύου παραμένει στο ίδιο επίπεδο με το αρχικό και μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι με τους δύο ToL. Αυτό φυσικά συμβαίνει καθώς έχουμε αλληλοκάλυψη περιοχών από το αρχικό δίκτυο.

5.2.2 Τοπολογία χαμηλής πυκνότητας

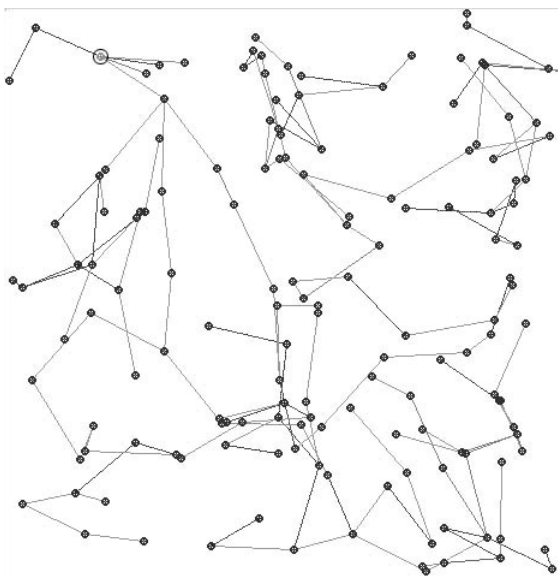
Πίνακας 7 FHF



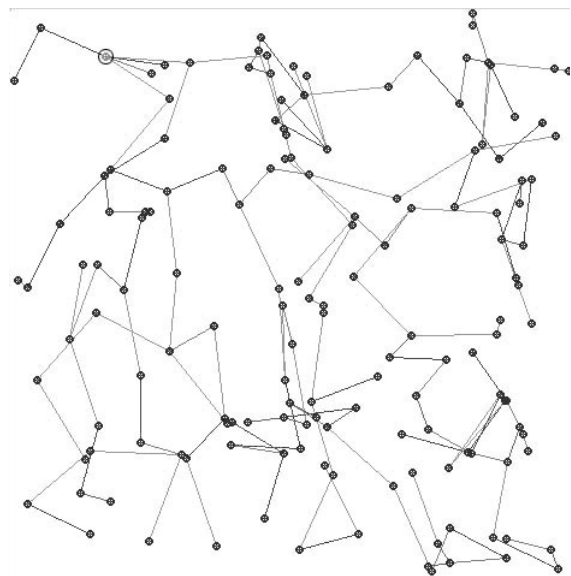
Πίνακας 8 ToL1



Πίνακας 9 ToL2

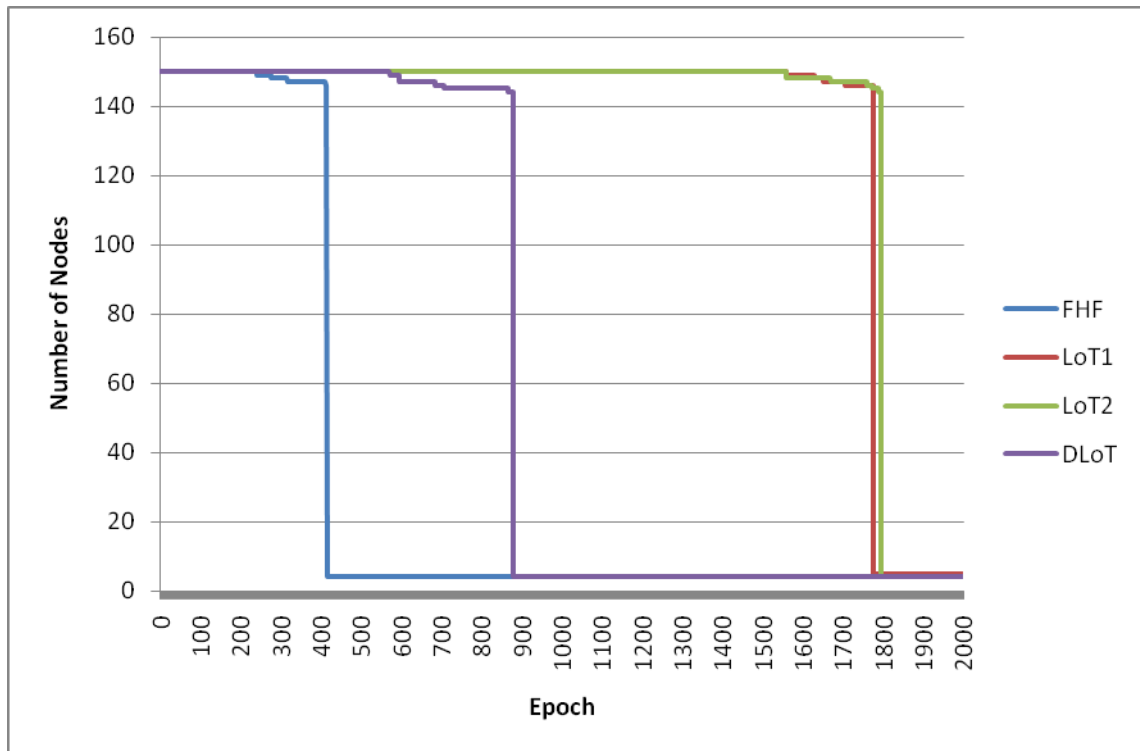


Πίνακας 10 DToL

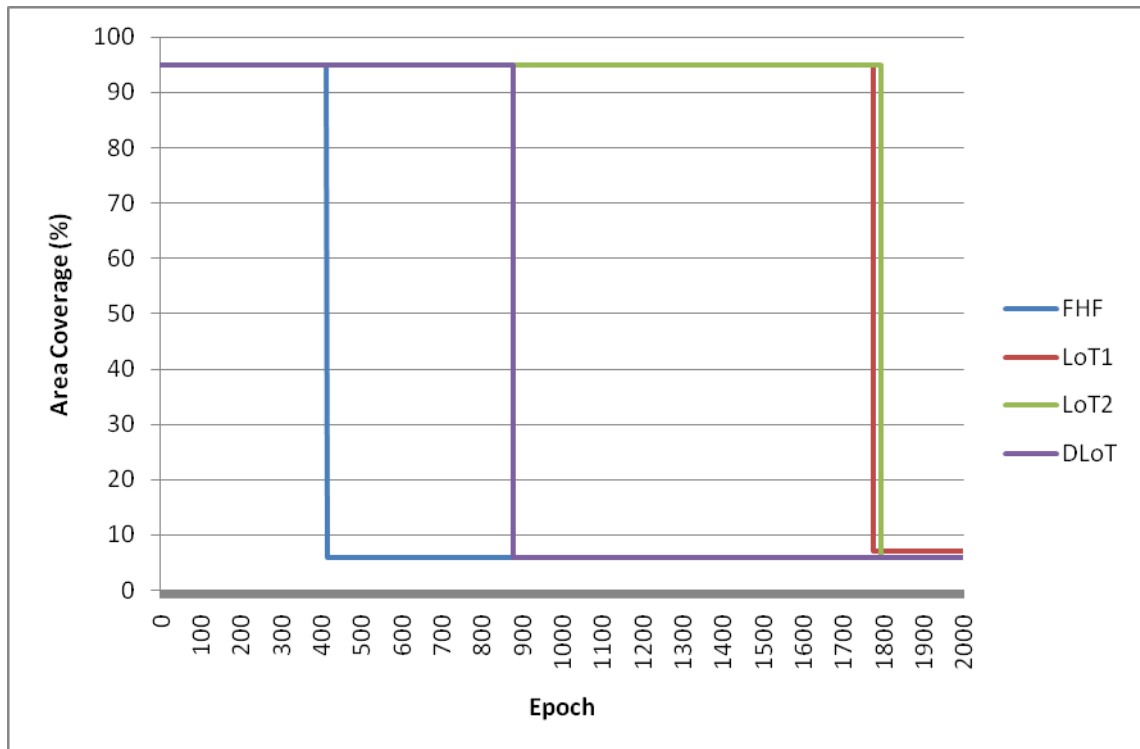


Το δίκτυο αποτελείται από 150 κόμβους σε μία περιοχή 120x120 μετρώων.

Πίνακας 11 Ζωή δικτύου



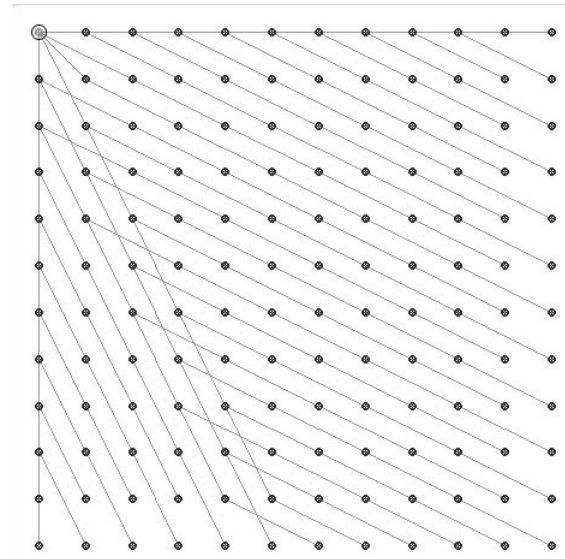
Πίνακας 12 Κάλυψη δικτύου



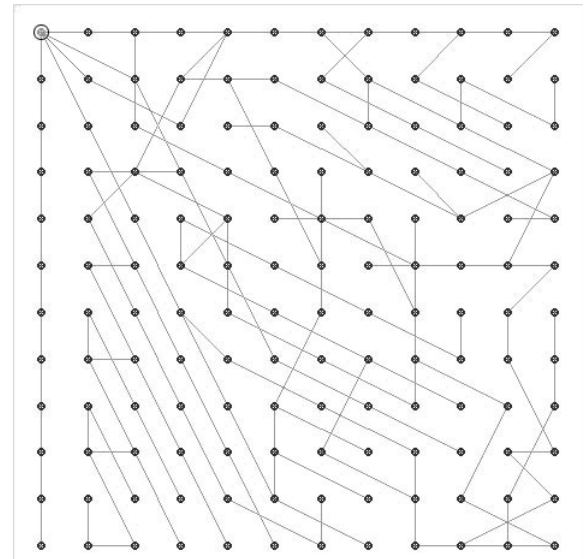
Στη περίπτωση μιας τοπολογίας χαμηλής πυκνότητας οι πιθανοί γείτονες για κάθε κόμβο μειώνονται. Το σημαντικό είναι πως Εδώ τα αποτελέσματα του DToL είναι κάπως μετριασμένα όμως παραμένουν καλύτερα από αυτά του FHF.

5.2.3 Τοπολογία τεχνικού περιβάλλοντος

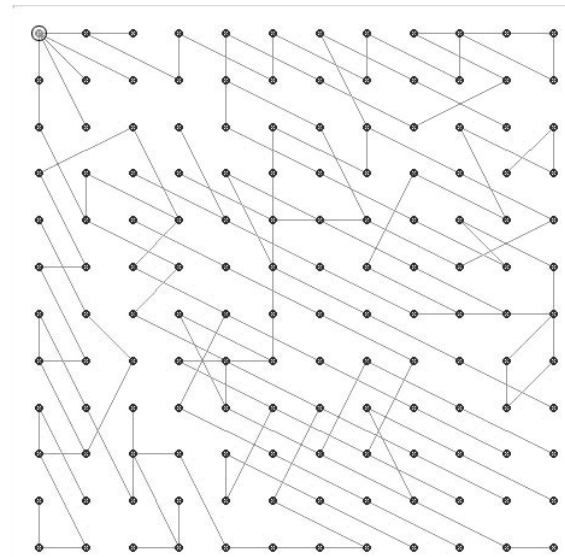
Πίνακας 13 FHF



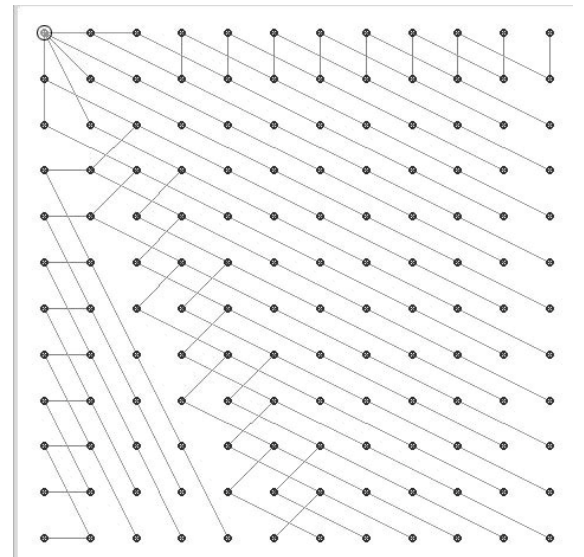
Πίνακας 14 ToL1



Πίνακας 15 ToL2

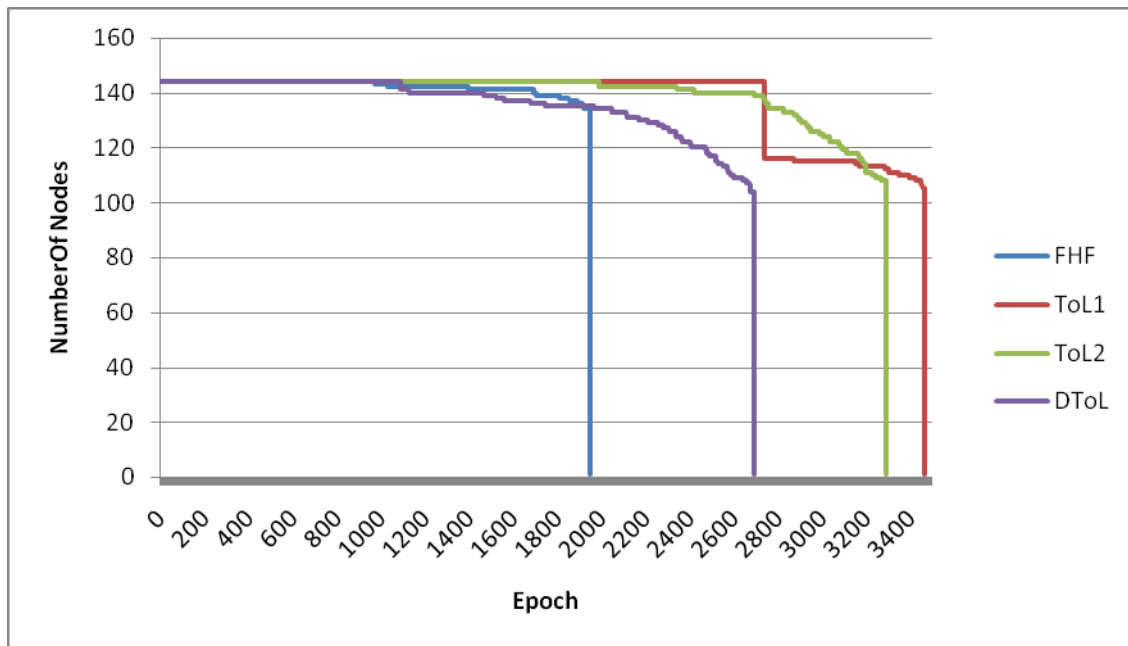


Πίνακας 16 DToL

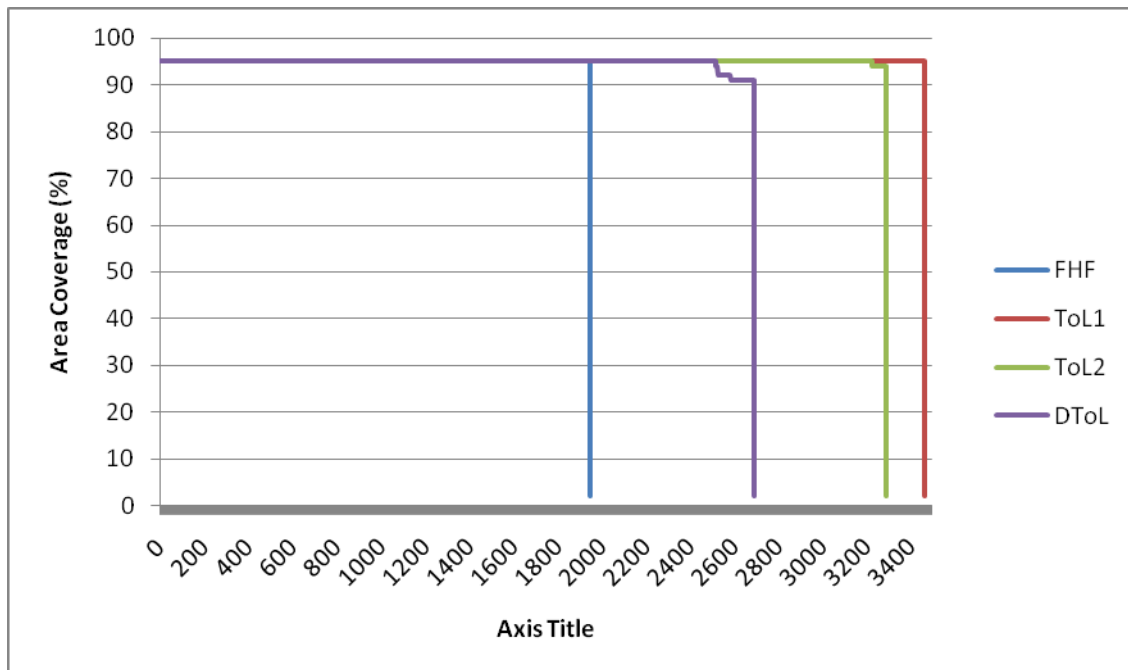


Η τοπολογία αποτελείται από 144 κόμβους σε μία περιοχή 120x120 μέτρων.

Πίνακας 17 Ζωή δικτύου



Πίνακας 18 Κάλυψη δικτύου



Ακόμη και στα στενά όρια της τοπολογίας αυτής οι ToL έχουν να επιδείξουν θετικά αποτελέσματα με τον DToL να μοιράζει την διαφορά τους με τον FHF.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Από τις πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήσαμε μπορούν αν εξαχθούν ένας αριθμός από σημαντικά στοιχεία

- Οι αλγόριθμοι ToL_1 και ToL_2 έχουν συστηματικά καλύτερες επιδόσεις από ότι ο FHF και παρόλο το γεγονός ότι είναι Centralized και απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέτρο σύγκρισης άλλων λύσεων
- Ο αλγόριθμος DToL τείνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν έχουμε τοπολογία υψηλής πυκνότητας όμως ακόμη και σε τοπολογίες με περιορισμένες επιλογές για πιθανούς πατέρες όπως δείχνει να φέρνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι ο FHF
- Το πολύ μικρό κόστος του DToL τον κάνει ιδανικό για κάθε εφαρμογή όπου η λειτουργία του δικτύου απαιτεί συχνά aggregation functions και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην παράταση του χρόνου ζωής τέτοιων δικτύων.

Κεφάλαιο 7

Μελλοντική Εργασία

Ένα σημαντικό στοιχείο για λειτουργία του αλγορίθμου αποτελεί η δυνατότητα γνώσης του πότε ένας Αισθητήρας έχει λάβει τα μηνύματα από όλα τα παιδιά του. Παρόλο που ο αριθμός των παιδιών είναι σημαντικά μικρότερος από αυτό που υπήρχαν με άλλους αλγορίθμους το κόστος επικοινωνίας πολλαπλασιάζεται για κάθε Αισθητήρα που λαμβάνει εκπρόθεσμα πακέτα από παιδιά του και τα αναμεταδίδει. Η προσθήκη ενός μηχανισμού που εξασφαλίζει την λήψη όλων των πιθανών πακέτων είναι προϋπόθεση ώστε η έρευνα να προχωρήσει στο επόμενο στάδιο που είναι η εφαρμογή του σε ΑΔΑ.

Χρήση προσομοιωτή όπως TOSSIM ή OPNET για την μελέτη της επίδρασης απώλειας πακέτων λόγω συγκρούσεων στη τοπολογία που δημιουργεί ο DTOL. Εξειδικευμένοι προσομοιωτές μπορούν να δώσουν μια καλύτερη εικόνα για το πώς θα συμπεριφερθεί το δίκτυο σε πραγματικές συνθήκες που περιλαμβάνουν αναμενόμενες απώλειες πακέτων αλλά και τυχαίες.

Τέλος θα πρέπει να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο σε πραγματικά δίκτυα ΑΔΑ. Η αξιολόγηση πραγματικού κόσμου είναι απαραίτητη για επικύρωση της ορθότητας της μεθοδολογίας που ακολουθήσαμε και για αν ελεγχθεί σε πιο βαθμό τα αποτελέσματα πραγματικού κόσμου μπορούν να πλησιάσουν αυτά της προσομοίωσης.

Βιβλιογραφία

1. *The post-PC era: it's about the services-enabled new Internet*. **R.H.Katz**. Boston, Massachusetts, United States : ACM New York, NY, USA, 2000. 1-58113-301-4 .
2. *COTS workshop: continuing collaborations for successful COTS development*. **John Dean, Patricia Oberndorf, Mark Vigder, Chris Abts, Hakan Erdogan, Neil Maiden, Michael Looney, George Heineman, Michael Gunter**. s.l. : ACM New York, NY, USA, 2001. 0163-5948 .
3. **Kay Romer, Friedemann Mattern**. The Design Space of Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications, IEEE*. 2004, Vol. 11, 6.
4. *Wireless Sensor Networks for Battlefield Surveillance*. **Tatiana Bokareva, Wen Hu, Salil Kanhere, Branko Ristic, Neil Gordon, Travis Bessell, Mark Rutten, Sanjay Jha**. Sydney, Australia : The University of New South Wales, 2006.
5. **Yu-Chee Tseng, You-Chiun Wang, Lun-Wu Yeh**. *iPower: An Energy Conservation System for Intelligent Buildings*. Taiwan : National Chiao-Tung University, 2002.
6. **S. BAPAT, W. LEAL, T. KWON, P. WEI, A. ARORA**. *Chowkidar: Reliable and Scalable Health Monitoring for Wireless Sensor Network Testbeds*. The Ohio State University.
7. *The Design Space of Wireless Sensor Networks*. **Kay Romer, Friedemann Mattern**. Zurich : ETH, 2005.
8. *Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks*. **Curt Schurgers, Mani B. Srivastava**. Vienna : MILCOM'01, 2001.
9. **Volkan Rodoplu, Teresa H. Meng**. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE J. Selected Areas in Communications*. 1999.
10. *Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment*. **Ram Ramanathan, Regina Hain**. s.l. : INFOCOM, 2000. Vol. 2.
11. *Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks*. **Li Li, Joseph Y. Halpern, Paramvir Bahl, Yi-Min Wang, Roger Wattenhofer**. s.l. : ACM Principles of distributed computing, 2001.
12. **Khaled Alzoubi, Xiang-Yang Li, Yu Wang, Peng-Jun Wan, Ophir Frieder**. Geometric spanners for wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions On Parallel And Distributed*. 2003, Vol. 14.

13. *Sensor Network Connectivity and Security Analysis Using a Single Per-node Random Key.* **Jason Barbour, Mohamed Younis.** 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks : IEEE Computer Society , 2007.
14. *Power-aware routing in mobile ad hoc networks.* **Suresh Singh, Mike Woo, C. S. Raghavendra.** Seattle : 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 1998.
15. **Sheetalkumar Doshi, Shweta Bhandare, Timothy X Brown.** An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun.* 3, 2002, Vol. 6.
16. **Sheetalkumar Doshi, Timothy X Brown.** Minimum energy routing schemes for a wireless ad hoc network. *IEEE INFOCOM.* 2002.
17. **Jae-Hwan Chang, Leandros Tassiulas.** Energy conserving routing in wireless ad hoc networks. *IEEE INFOCOM.* 2000.
18. **Arvind Sankar, Zhen Liu.** Maximum lifetime routing in wireless ad-hoc networks. *IEEE INFOCOM.* 2004.
19. **Predrag R. Jelenković, Petar Momčilović, Mark S. Squillante.** Scalability of wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking.* 2007, Vol. 15, 2.
20. *Quality of Service in Wireless Networks.* **Vittorio Bilò, Adriano Di Pasquale, Fabio Fioravanti, Michele Flammini, Luca Forlizzi, Francesco Lo Presti, Giovanna Melideo, Enrico Nardelli, Alfredo Navarra, Guido Proietti.** s.l. : International Parallel and Distributed Processing Symposium , 2003.
21. *BBS: An Energy Efficient Localized Routing Scheme for Query Processing in Wireless Sensor Networks.* **Jie Lian, Lei Chen, Kshirasagar Naik, M. Tamer Özsu, Gordon B. Agnew.** 1, s.l. : International Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, Vol. 2.
22. *On Node Lifetime Problem for Energy-Constrained ireless Sensor Networks.* **Y. Thomas Hou, Yi Shi, Hanif D. Sherali.** 2005.
23. *The Design of an Acquisitional Query Processor for Sensor Networks.* **S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, W. Hong.** s.l. : Proc. of ACM SIGMOD, 2003.
24. *Wave Scheduling: Energy-Efficient Data Dissemination for Sensor Networks.* **A. Trigoni, Y. Yao, A. Demers, J. Gehrke and R. Rajaraman.** s.l. : Workshop on Data Management for Sensor Networks, 2004.
25. *Span: An Energy-efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks.* **B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris.** 5, s.l. : ACM wireless networks, 2002, Vol. 8.

26. *Maximum-Energy Shortest Path Tree for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks*. **Yunyi Zhang, Yi Wang, Deyun Zhang, Chongzheng Huang**. s.l. : Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007.
27. *An Efficient Topology Maintenance Algorithm Based on Shortest Path Tree for Wireless Sensor Networks*. **Zhong Shen, Yilin Chang, Xin Zhang, Can Cui**. Dalian : Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 2005.
28. *Probability Based Dynamic Load-Balancing Tree Algorithm for Wireless Sensor Networks*. **Tingxin Yan, Yanzhong Bi, Limin Sun, Hongsong Zhu**. Beijing : Chinese Academy of Science, 2005.
29. *Better tree - better fruits: using dominating set trees for MAX queries*. **Baljeet Malhotra, Mario A. Nascimento, Ioanis Nikolaidis**. Auckland : ACM International Conference Proceeding Series archive, 2008.
30. *Location-Aware Routing for Data Aggregation in Sensor*. **Jonathan Beaver, Mohamed A. Sharaf, Alexandros Labrinidis, Panos K. Chrysanthis**. Pittsburgh, USA : University of Pittsburgh, 2003.
31. *ETC: Energy-driven Tree Construction in Wireless Sensor Networks*. **P. Andreou, A. Pamboris, D. Zeinalipour-Yazti, P.K. Chrysanthis, G. Samaras**. s.l. : nternational Workshop on Sensor Network Technologies for Information Explosion Era, 2009.
32. *Closeness of NP-Hard Sets to Other Complexity Classes*. **Hong-zhou Li, Bin Fu**. 2, Haifa : SIAM Journal on Computing, 1994, Vol. 23. 0097-5397 .